

PROGRAMA DE AHORRO DE ENERGÍA BASADO EN EL CONTROL DE LA
FRICCIÓN EN LOS SISTEMAS TRIBOLÓGICOS

JUAN GUILLERMO CASTAÑO CARDONA

SEBASTIAN ROJAS FORERO

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS

ESCUELA INGENIERÍA MECÁNICA

ESPECIALIZACIÓN EN GERENCIA DE MANTENIMIENTO

BUCARAMANGA

2014

PROGRAMA DE AHORRO DE ENERGÍA BASADO EN EL CONTROL DE LA
FRICCIÓN EN LOS SISTEMAS TRIBOLÓGICOS

JUAN GUILLERMO CASTAÑO CARDONA

SEBASTIAN ROJAS FORERO

Monografía de Grado presentada como requisito para optar el título de
Especialista en Gerencia de Mantenimiento

Director: ALBARRACÍN AGUILLON PEDRO RAMÓN

Ingeniero Mecánico

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS

ESCUELA INGENIERÍA MECÁNICA

ESPECIALIZACIÓN EN GERENCIA DE MANTENIMIENTO

BUCARAMANGA

2014

Agradecemos el apoyo incondicional
Por parte de la familia
Desde que empezó este posgrado.
Y a la vida por la oportunidad de conocer
Nuevas, buenas personas. Al ingeniero
Pedro Ramón Albarracín Aguillón por sus aportes y
Acompañamiento en este trabajo y su decidido esfuerzo
En difundir el conocimiento tribológico en el país.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	14
1. TRIBOLOGÍA	15
1.1 HISTORIA	15
1.2 SISTEMA TRIBOLÓGICO	18
1.2.1 Curva tribológica	18
1.3 LUBRICACIÓN	21
1.3.1 Película lubricante	22
1.4 TIPOS DE LUBRICACIÓN	23
1.4.1 Límite	23
1.4.2 Hidrodinámica (HD)	25
1.4.3 Elastohidrodinámica (EHL)	26
1.4.4 Hidrostática	27
1.5 LUBRICANTES	29
1.5.1 Lubricantes (Bases) Minerales	29
1.5.2 Lubricantes (Bases) Sintéticos	29
1.5.3 Viscosidad en índice de viscosidad (IV)	31
1.5.4 Clasificación ISO	32
1.5.5 Clasificación SAE	34
1.6 ADITIVOS	36
1.6.1 Antioxidantes	36
1.6.2 Anticorrosivos y anti herrumbre	36

1.6.3 Antiespumantes	
37	
1.6.4 Demulsificante	37
1.6.5 Depresores de punto de fluidez	37
1.6.6 Mejoradores del índice de viscosidad (MIV)	37
1.6.7 Anti desgaste (AW) y Extrema Presión (EP)	37
1.6.8 Detergente	38
1.6.9 Agentes de adhesión	38
2. FRICCIÓN	39
2.1 FUERZA DE FRICCIÓN	39
2.1.1 Estática (Fe)	40
2.1.2 Cinética (Fk)	41
2.2 COEFICIENTE DE FRICCIÓN	45
2.3 FALLA CATASTRÓFICA	47
3. DESGASTE	49
3.1 TIPOS DE DESGASTE	50
3.1.1 Adhesivo	50
3.1.2 Erosivo	51
3.1.3 Corrosivo	51
3.1.4 Por cavitación	51
3.1.5 Por corrientes eléctricas	52
3.1.6 Por fatiga superficial	52

3.1.7 Abrasivo	52
3.2 CONSECUENCIAS DEL DESGASTE	53
3.3 CONTROL DE LOS DIFERENTES TIPOS DE DESGASTE	54
3.4 EFECTO DE LA RUGOSIDAD EN EL DESGASTE DE LOS MECANISMOS	
3.5 RUGOSIDAD	55
3.5.1 Tipos de rugosidad	57
3.5.1.1 Agudas	57
3.5.1.2 Dentadas	57
4. PROPUESTA DEL PROGRAMA DE AHORRO	58
4.1 PASOS	59
4.1.1 Identificación de parámetros y condiciones	59
4.1.2 Cálculo del consumo de energía por fricción	61
4.1.3 Elección de alternativa	62
4.1.4 Cálculo nuevo y comparación. Ejemplos	63
5. CONCLUSIONES	70
BIBLIOGRAFÍA	72

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Curva tribológica de los rodamientos de una bomba centrífuga.	19
Figura 2. Película lubricante entre dos cuerpos en contacto	22
Figura 3. Curva de Stribeck.	23
Figura 4. Lubricación límite	24
Figura 5. Lubricación Hidrodinámica	26
Figura 6. Lubricación Elasto Hidrodinámica (EHL) Deformacion de crestas	27
Figura 7. Lubricación Hidrostática	28
Figura 8. Homogeneidad de estructura de bases lubricantes	30
Figura 9. Índice de viscosidad para un ISO 100.	32
Figura 10. Clasificación de aditivos.	36
Figura 11. Componentes de la fuerza de fricción	40
Figura 12. Componentes de la fuerza de fricción estática	41
Figura 13. Componentes de la fuerza de fricción cinética	42
Figura 14. Fricción metal-metal	43
Figura 15. Fricción sólida	44
Figura 16. Fricción mixta	44
Figura 17. Fricción fluida	45
Figura 18. Falla catastrófica en engranaje	48
Figura 19. Desgaste adhesivo entre dos piezas en movimiento	51
Figura 20. Desgaste debido a la presencia de partículas duras	53
Figura 21. Rugosidad en metales	55
Figura 22 Sistemas tribológicos en un reductor de velocidad de tres ejes	67

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Prestaciones de Lubricantes Minerales Vs. Sintéticos	30
Tabla 2. Clasificación ISO.	33
Tabla 3. Clasificación SAE	34
Tabla 4. Tabla comparativa de viscosidades.	35
Tabla 5. Valores de coeficiente de fricción para aceites minerales y sintéticos, en diferentes mecanismos y condiciones de lubricación	46

RESUMEN

TITULO: PROGRAMA DE AHORRO DE ENERGÍA BASADO EN EL CONTROL DE LA FRICCIÓN EN LOS SISTEMAS TRIBOLÓGICOS *

AUTORES: JUAN GUILLERMO CARDONA CASTAÑO, SEBASTIÁN ROJAS FORERO **

Palabras clave: tribología, ahorro, maquinas rotativas, lubricación, lubricación limite, HD, EHL, Hidrostática

Este trabajo hace una revisión teórica de temas relacionados con la lubricación, partiendo de un recuento histórico de su evolución a través del tiempo (Griegos, Romanos, Dowson, Higginson) hasta el estudio de los sistemas tribológicos, tipos de lubricación, lubricantes, viscosidad, índice de viscosidad (IV), aditivos (anti herrumbre, antiespumantes, EP, AW, entre otros), fuerza de fricción, coeficiente de fricción, desgaste, falla catastrófica y rugosidad, entre otros temas. Adicionalmente se expone mediante ejemplos el método para calcular el consumo de energía de diferentes mecanismos en equipos rotativos, mostrando que es factible disminuir los costos de operación por menor consumo de energía por fricción, que finalmente se traducen en ahorro en mantenimiento de los equipos, se logra alcanzar la vida de diseño especificada por el fabricante y se aumenta la confiabilidad de las máquinas y la producción de las mismas al disminuir paros no programados.

La correcta selección de un buen lubricante debe disminuir al máximo el desgaste de las superficies lubricadas, el calor generado por fricción, el consumo de energía y el impacto sobre el ambiente. En este sentido los lubricantes sintéticos se presentan como una alternativa importante aclarando que siempre se deberá evaluar la relación costo beneficio.

Generar conciencia en torno a la formación y capacitación de las personas responsables de los programas de lubricación al interior de las empresas es una necesidad urgente para poder afrontar la actual economía de mercado abierto.

* MONOGRAFIA

**FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS, ESCUELA INGENIERÍA MECÁNICA,
DIRECTOR: ING. PEDRO R. ALBARRACÍN

SUMMARY

TITLE: SAVING ENERGY PROGRAM BASED IN THE CONTROL OF FRICTION IN TRIBOLOGIC SYSTEMS *

AUTHORS: JUAN GUILLERMO CARDONA CASTAÑO, SEBASTIÁN ROJAS FORERO **

Keywords: tribology, saving, rotating machinery, lubrication, boundary lubrication, HD, EHL, Hydrostatic

This paper makes a theoretical review of issues related to lubrication, beginning with a historical review (Greeks, Romans, Dowson, Higginson) and its evolution through time, also the study of tribological systems, types of lubrication, lubricants, viscosity, viscosity index (VI), additives (anti rust, anti foam, EP, AW, etc.), friction force, coefficient of friction, wear, roughness and catastrophic failure, among other topics. Additionally, a method for calculating the energy consumption in different rotating mechanisms is shown through examples. Evidencing that it is feasible to reduce operating costs by reducing consumption of energy decreasing the existing friction. This ultimately translate into savings in equipment maintenance by reaching the design life specified by the manufacturer. In this way, the reliability of the machines and the production increases by reducing unscheduled breakdowns.

The correct selection of a good lubricant must reduce the maximum wear of lubricated surfaces, frictional heat, energy consumption and impact on the environment. In this way, synthetic lubricants are presented as an important alternative clarifying that always is a must to evaluate the cost benefit.

Raising awareness about the education and training of those responsible for the lubrication programs within companies is an urgent need to address the current open market economy.

* MONOGRAPH

**PHYSICAL-MECHANIC ENGINEERING FACULTY, MECHANICAL ENGINEERING,
DIRECTOR: ENG. PEDRO R. ALBARRACÍN

INTRODUCCIÓN

Leonardo Da Vinci fue el primero en postular un acercamiento a la fricción. Da Vinci dedujo las leyes que gobiernan el movimiento de un bloque rectangular desplazándose sobre una superficie plana e introdujo el concepto de coeficiente de fricción.

La tribología está presente en todos los aspectos de las máquinas, motores y componentes de la industria, y como ciencia centra su estudio en tres fenómenos: la fricción entre dos cuerpos en movimiento, el desgaste como efecto natural de este fenómeno y la lubricación como un medio para evitar el desgaste.

Las aplicaciones más comunes del conocimiento tribológico se presentan entre otros en los motores eléctricos y de combustión, en turbinas, fundición, forja, procesos de corte, elementos de almacenamiento magnético y prótesis articulares para el cuerpo humano que se traducen en aumento de la vida útil de los equipos, ahorro de energía, ahorro económico y protección al medio ambiente.

Hoy en día las empresas de clase mundial entienden que dentro de una economía globalizada en presencia de mercados abiertos de alta competencia es necesario garantizar la efectividad en todos los procesos productivos con calidad y costos competitivos que aseguren su permanencia en el tiempo.

La confiabilidad de las máquinas se obtiene cuando sus componentes alcanzan la vida de diseño especificada por los fabricantes y esto se logra a través de la implementación de programas correctos de lubricación ejecutados por personas idóneas en el tema que garanticen finalmente la disponibilidad de los equipos.

1. TRIBOLOGÍA

1.1 HISTORIA

La *Tribología* (*Tribos* (fricción); *Logos* (estudio)) se considera una ciencia interdisciplinaria que conjuga toda una serie de elementos importantes en el diseño, fabricación y operación de las máquinas como la fricción, naturaleza de los materiales, rugosidad, desgaste, lubricación, consumo de energía y medio ambiente.¹

Fue en la antigüedad donde por primera vez el hombre contempló el desgaste como un problema cuando este dejó de ser nómada e instaló puertas en las primeras casas. Los hallazgos indican que tenían cavidades de piedra que hacían de bisagra y donde además se encontraron residuos de grasa animal y allí tomaba forma la tribología. Aristóteles, tiempo después, realizó sus estudios de la fricción concluyendo que la fuerza de fricción era menor en objetos redondos que en los planos. Así mismo, los romanos se interesaron siempre por controlar el desgaste y fue así como llegaron a diseñar y fabricar los primeros rodamientos de bolas y rodillos cilíndricos y cónicos tomando como base los estudios de Aristóteles. Las primeras aplicaciones de dichos rodamientos fueron plataformas giratorias y carros de guerra, estos eran lubricados con grasa vegetal y/o animal la cual se depositaba en ranuras hechas para ello.

Leonardo Da Vinci (1452-1519) fue quien formuló por primera vez las siguientes leyes de la fricción:

- Es directamente proporcional al coeficiente de fricción y al peso del cuerpo en movimiento (fuerza).
- Depende del área (microscópica) real de contacto y no del área aparente del cuerpo deslizante.

¹ Albarracín Aguilón, Pedro Ramón. Tribología y Lubricación. Cap. 2 Tribología

Así mismo y consecuente con su interés en el estudio de la fricción, Da Vinci propuso la utilización de un material que luego perfecciono el señor Isaac Babbitt (1839) y que lleva a este último como nombre. Pero Da Vinci hizo más observaciones e indicó la necesidad de que los rodamientos de bolas tuvieran jaulas que separaran los elementos rodantes, concepto que hoy en día está vigente. En 1964 Bowden y Tabor corroboraron las teorías de Leonardo Da Vinci y Guillaume Amontons con la realización de una serie de experimentos entre superficies madera-madera y madera-hierro y encontraron que el coeficiente de fricción entre dichas superficies estaba comprendida entre 0.2 - 0.6 si no se lubrican y de 0.2 cuando se utiliza agua como lubricante.²

Con la llegada de la Revolución industrial los primeros estudios científicos sobre la fricción y el desgaste dieron origen a desarrollos empíricos de grasas y aceites vegetales y animales. Hacia 1883 Petrov y Tower desarrollaron la teoría de la lubricación fluida dinámica mediante el estudio de la viscosidad y el flujo de líquidos a través de tuberías.

En los 40`s fue cuando se aplicó directamente la tribología en los componentes de maquinaria industrial. Esto debido a que la industria demandaba una solución a los problemas de desgaste prematuro por fatiga superficial y adhesión. Generalmente estas se presentaban en las máquinas sometidas a condiciones de altos torques, elevadas cargas dinámicas, bajas velocidades y temperaturas de operación superiores a los 50° C.

Inicialmente el parámetro más importante era determinar la viscosidad del lubricante a utilizar. Esto resultaba en que para condiciones de bajas cargas dinámicas y altas velocidades la viscosidad debía ser baja, mientras que para condiciones totalmente opuestas la viscosidad debía ser alta. Sin embargo, en esta última condición a pesar de que la viscosidad estaba bien definida se presentaban problemas de fatiga superficial y adhesión lo que desencadenaba

² Op. Cit, ALBARRACIN

fallas catastróficas antes de lo esperado. Y fue debido a esto que Dowson y Higginson, hacen su aporte a la tribología introduciendo el concepto de las teorías Elastohidrodinámicas en base a estudios en engranajes de reductores de velocidad.

Duncan Dowson es considerado el padre de la tribología y fue quien por primera vez planteó que todos los mecanismos flotan sobre delgadas capas de líquidos que obedecen a las leyes de la hidrodinámica. Adicionalmente fue él quien planteo en términos económicos el tema diciendo *“Cuando la gente habla de lubricación, piensa solo en una lata de aceite y en un trapo sucio, y hay una gran dosis de verdad en ello; por ejemplo, los rodamientos son demasiado sencillos y es fácil desatenderlos. Sin embargo, el tema es económicamente relevante, ya que si el rodamiento soporta el rodillo de laminación del acero en una siderúrgica, su reemplazo puede generar altos costos de mantenimiento y altas pérdidas en la producción de la planta”*.

Osborne Reynolds fue quien con sus estudios de mecánica de fluidos propuso que las propiedades de las películas lubricantes podían ser previstas. Complementando con esto y en base a sus observaciones en reductores de velocidad, Dowson y Higginson introdujeron un nuevo concepto: aditivos de Extrema Presión (EP).

De aquí en adelante los avances en tribología se dieron rápidamente ya que no solo la industria se empezó a interesar en el tema sino también los gobiernos e incluso la medicina y veterinaria. Y es por esto que hoy en día se tiene claro que los únicos tipos de lubricación que se pueden presentar en los componentes de maquinas sometidos a fricción son: Lubricación Hidrodinámica (HD), Elastohidrodinámica (EHL), lubricación mixta y lubricación límite. La tribología, además, trae consigo una reducción considerable en costos de mantenimiento y consumo de energía por fricción.

1.2 SISTEMA TRIBOLÓGICO (ST)

El hombre siempre se ha preocupado por controlar la fricción para disminuir el desgaste y el consumo energético, ya que esto es determinante en la rentabilidad de cualquier negocio. Según estudios realizados en USA se calcula que las pérdidas anuales de energía por fricción en la industria automotriz, es la necesaria para cubrir las necesidades de Nueva York en el mismo tiempo. Pero todo esto se da y es posible dentro de un sistema tribológico. Se define como un sistema natural o artificial de elementos materiales, por lo menos dos, donde se presenta la fricción y en casos extremos desgaste.³ Se dice que un sistema puede ser positivo si reduce la fricción o negativo si por el contrario la propicia. En últimas lo que la tribología pretende es lograr que los elementos de máquinas logren su Vida disponible (Vd) y esto se da cuando el sistema tribológico es positivo. Además, si la vida disponible se asegura los equipos van a ser confiables y así mismo productivos y rentables.

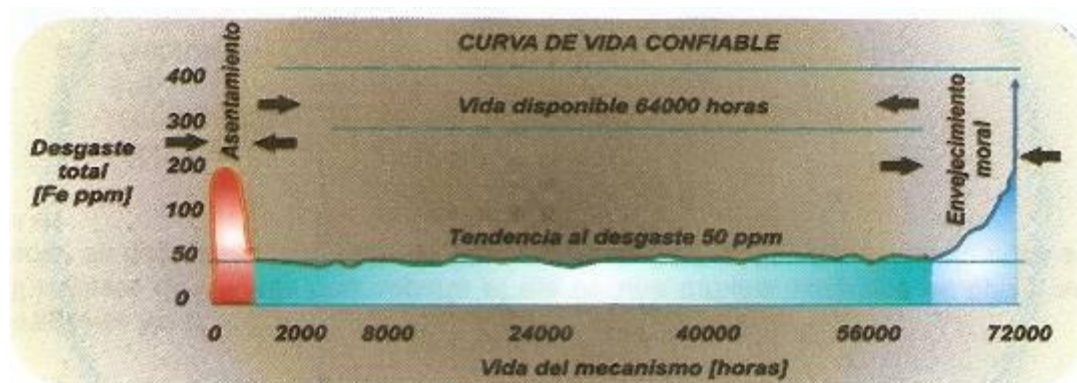
1.2.1 Curva tribológica

“La curva tribológica de los componentes de una máquina es muy similar a la curva de la bañera de Davis (referida a las diferentes etapas en las que pueden fallar los componentes de las máquinas) y se conoce también como la curva de desgaste normal de cada uno de ellos a través del tiempo; es característica para cada uno de los diferentes metales que constituyen la metalurgia de los mecanismos de la máquina y su contenido se especifica en las partes por millón (ppm) que pueden haber presentes en el aceite que se está utilizando al cumplirse su frecuencia de cambio. La curva tribológica tiene tres etapas fundamentales que son: improductiva o asentamiento del componente, productiva o vida a la fatiga y final o vida remanente (envejecimiento moral).”⁴

³ Apuntes en clase “Mantenimiento Predictivo: Tribología”, Gerencia de Mantenimiento, ASEDUIS

⁴ Albarracín Aguillón Pedro Ramón, Artículo Técnico No. 004 “Vida de las máquinas”, Abril 19 de 2008

Figura 1. Curva tribológica de los rodamientos de una bomba centrífuga.



Fuente: Tribología y Lubricación. Albarracín Pedro Capítulo 2

Para el desarrollo y cálculo de curvas tribológicas se tienen en cuenta aspectos tales como pérdidas de material de los elementos de máquina, horas de operación, desgastes máximos permisibles, temperaturas de operación, Índice de Viscosidad (IV), Grado de limpieza ISO 4406-99, entre otros.

- Etapas de asentamiento

Es la etapa más importante de todas en la vida del mecanismo y de esta depende que alcance o no la vida disponible. Se da en las primeras horas de operación de la máquina y dependiendo del mecanismo y las propiedades físico-químicas del sistema, puede ser una etapa larga o corta. El elevado desgaste presente en esta etapa se debe a la disminución de crestas, remanentes del proceso de mecanizado de todo componente nuevo, que se pulen. Durante esta etapa es importante no llevar a condiciones máximas de operación al mecanismo ya que las superficies de contacto para las que fueron diseñadas pueden ser menores debido a que no ha habido un correcto y completo asentamiento.

Si las condiciones lo permiten lo mejor es usar el aceite recomendado por el fabricante con condiciones de no operar al 100%. Sin embargo cuando el tiempo apremia se pueden propiciar condiciones para que el asentamiento sea más ligero. Una manera de hacerlo es operando el mecanismo nuevo con un aceite con grado ISO mayor al recomendado. Esto tendrá un efecto de pulir más rápidamente las superficies para que la rugosidad promedio llegue a valores normales de operación. Este fenómeno se da

al romper las películas límites de las superficies y desgastar las superficies erosivamente con las capas de aceite en exceso que forzosamente entran entre los picos.

Otro aspecto relevante en la etapa de asentamiento es el tipo de sistema de lubricación. Si el sistema es por baño o salpique es importantísimo mantener el aceite filtrado o hacer un cambio prematuro del aceite o filtrarlo para que esas pequeñas partículas no empiecen a generar problemas de desgaste abrasivo o anormal. Por otro lado, si el sistema de circulación es imprescindible el seguimiento de la caída presión en los filtros así como hacer el conteo de partículas (ISO 4406-99) para obtener relación de filtración y eficiencia del filtro. Acá se hace importante también analizar la tendencia al desgaste: lo que se espera que esté presente, en ppm, de partículas de desgaste de cada uno de los componentes del mecanismo cada vez que se cambie el aceite por vida de servicio. Este parámetro es el que por medio de un análisis de aceite nos dice si la etapa de asentamiento llegó o no a su fin. El fin de este periodo llega cuando el contenido de metales en el aceite analizado coincide con la tendencia normal al desgaste. De igual manera la temperatura de operación debe disminuir al existir cada vez menos fricción entre las superficies.

- *Etapas productiva o vida disponible*

La principal característica de esta etapa es que el nivel de desgaste del mecanismo permanece constante y nunca llega a ser cero. Y es que aun con un buen sistema de lubricación y filtración así como con buenos lubricantes siempre se van a presentar desgastes considerados normales, que son inherentes del funcionamiento del equipo o se dan debido a variaciones de características del lubricante. Se presenta desgaste adhesivo normal en el momento de puesta en marcha debido a que cuando el equipo para, las rugosidades empiezan a interactuar ya que se rompe la capa límite. También se presenta desgaste erosivo y abrasivo normal y esto se debe a las finas partículas que llevan inclusive los aceites nuevos y limpios. Por último, se tiene desgaste por fatiga superficial normal la cual se da por la variación de la viscosidad del aceite en operación. Se dice que el mecanismo está teniendo un correcto desempeño y

funcionamiento si el análisis por espectroscopia de absorción arroja cantidades aproximadas o menores a la tendencia normal del desgaste.

La curva tribológica de un mecanismo puede ser positiva o negativa. “Los factores que más inciden para que el mecanismo alcance su *Vida Disponible* (V_d) son: *carga, viscosidad, temperatura de operación, oxidación, agua, y contaminación*”⁵, y estos deben ser controlados de manera efectiva para que se logre la curva positiva. Esta curva positiva es bastante productiva y aumenta la confiabilidad del equipo aunque es difícil de lograr ya que se deben tener conocimientos de tribología y saber aplicarlos en campo. Por otro lado, la curva negativa es más fácil de encontrar en la práctica y se da en consecuencia de un mal control de los factores anteriormente mencionados lo que conlleva a un acelerado desgaste de los componentes del mecanismo.

- *Etapas finales*

Esta etapa es en la que se presenta un desgaste acelerado de los componentes del mecanismo y esto se hace evidente en el análisis del contenido de metales en el aceite. Es muy importante conocer y aprovechar esta etapa ya que si se deja mucho tiempo con dicho desgaste se puede llegar a falla catastrófica mientras que si se cambia prematuramente el mecanismo, estamos elevando los costos de mantenimiento innecesariamente. Para una mejor determinación de la etapa final se pueden usar técnicas de monitoreo tales como termografía, conteo de partículas y ferrografía entre otros.

1.3 LUBRICACIÓN

“La lubricación es la interposición, entre dos superficies metálicas que se encuentran en movimiento relativo la una con respecto a la otra, de una sustancia con unas propiedades específicas, conocida con el nombre de lubricante.”⁶ Se debe saber que cuando haya una buena lubricación, lo cual incluye la correcta selección de un lubricante, la única fricción presente en el sistema tribológico debería ser la existente entre las capas de lubricante.

⁵ Albarracín Aguillón, Pedro Ramón. Tribología y Lubricación. Cap. 2 Tribología

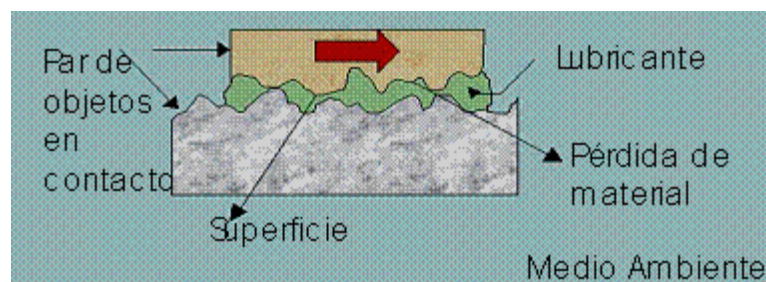
⁶ Op. Cit. ALBARRACIN

1.3.1 Película lubricante

Es la película que permite mantener separadas las superficies del sistema tribológico y puede ser sólida, mixta o fluida. A la película sólida la constituyen los aditivos (EP/AW) y se presenta en la puesta en marcha de cualquier mecanismo. Cuando la película es sólida es porque además de aditivos tiene una pequeña porción de lubricante, sin embargo no alcanza a ser suficiente para separar ambas superficies. Es por esto que es un estado transitorio y dependiendo del régimen en que termine operando el sistema reciben su nombre. Si es HD: transitoria mixta, si es EHL: mixta.

Por último la película fluida es aquella que está constituida bien sea por capas (lub.mineral) o esferas (sintético/vegetal) y se presenta cuando el sistema opera en condiciones de lubricación HD. La estabilidad de esta película depende del Índice de Viscosidad (IV), ya que es el que determina que tanto cambian o no las propiedades del lubricante con el cambio de temperatura de operación. Esto último puede hacer cambiar el flujo de estado erosionando así las superficies y rompiendo la película.

Figura 2. Película lubricante entre dos cuerpos en contacto



Fuente: Tribología: Fricción, desgaste y lubricación Díaz Del Castillo, FELIPE 2007

1.4 TIPOS DE LUBRICACIÓN

La película lubricante que se forme es la que define el tipo de lubricación bajo el cual trabaja un mecanismo. “Cuando el mecanismo lubricado se pone en operación la lubricación es límite, pero cuando alcanza la velocidad nominal de operación, solo puede quedar trabajando bajo condiciones de lubricación HD ó EHL,”⁷ La correcta distinción entre estas últimas dos condiciones es determinante para alcanzar o no la Vida disponible. La curva de Stribeck es la que define las zonas de fricción y de lubricación.

Figura 3. Curva de Stribeck.



Fuente: Albarracín Pedro, Tribología y Lubricación Cap. 2

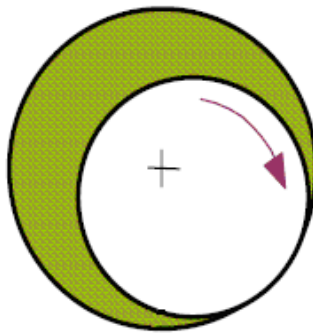
1.4.1 Límite

Este régimen de lubricación lo experimentan los mecanismos que bien tengan EHL o HD. Se presenta cuando se manifiesta la película límite, es decir, en el momento de puesta en marcha del mecanismo. Las rugosidades estarán entrelazadas y lo único que hay entre ellas son los aditivos que constituyen la película. La acción del lubricante en este punto es asegurarse de que dichos picos de rugosidad no se fracturen sino que se deformen elásticamente

⁷ Op. Cit. ALBRRACIN

mientras se forma la película lubricante. Es definitivo el comportamiento de los aditivos bien sea EP o AW ya que estos son los que aseguran que se forme la película límite para evitar o por lo menos disminuir el desgaste adhesivo en el mecanismo.

Figura 4. Lubricación límite



Lubricación límite. La capa de lubricante es muy pequeña. Se produce durante el arranque o parada

Fuente: Lubricación en motores alternativos de gas Disponible en:
<http://mantenimientoindustrial.wikispaces.com/Lubricaci%C3%B3n+en+motores+alternativos+de+gas> 2-11-13

1.4.2 Hidrodinámica (HD)

“Se refiere al suministro de suficiente lubricante a la interfaz en deslizamiento para permitir que la velocidad relativa de las superficies en contacto bombeen lubricante dentro del espacio, que las separa, mediante una película dinámica de líquido.”⁸ Es decir, que se tiene como principal y más relevante característica que las superficies se separen por completo en operación, además de que los aditivos que se deben usar son los de anti desgaste (AW). Al momento del arranque es en donde se presenta la mayor cantidad de desgaste en los mecanismos que se lubrican con este régimen.

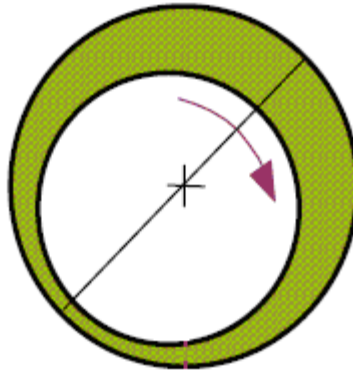
“Antes de que el mecanismo alcance su velocidad nominal de operación, se presenta una *condición intermedia* entre lubricación límite e hidrodinámica conocida como “*lubricación elastohidrodinámica transitoria*”; en este caso solo una parte de la carga es soportada por la acción hidrodinámica del lubricante y la otra, por la película límite del aditivo metálico AW, que recubre las rugosidades que aún interactúan.”⁹ Esto es importante que sea transitorio ya que se volvería un régimen EHL y los aditivos no formarían la película límite presentando entonces alto desgaste adhesivo en el mecanismo.

La característica más importante para que la lubricación HD se dé es que el flujo sea laminar para cumplir la condición de velocidad cero en la frontera y de esa manera asegurarse de que la película límite nunca se desprenda y no ocurra desgaste erosivo por el fluido.

⁸ Norton Robert L., Diseño de Maquinas. Cap. 10

⁹ Albarracín Aguillón, Pedro Ramón. Tribología y Lubricación. Cap. 2 Tribología

Figura 5. Lubricación Hidrodinámica



Lubricación hidrodinámica. El lubricante se introduce entre las superficies por el propio movimiento del rotor, que crea un gradiente de presión

Fuente: Lubricación en motores alternativos de gas Disponible en:

<http://mantenimientoindustrial.wikispaces.com/Lubricaci%C3%B3n+en+motores+alternativos+de+gas> 2-11-13

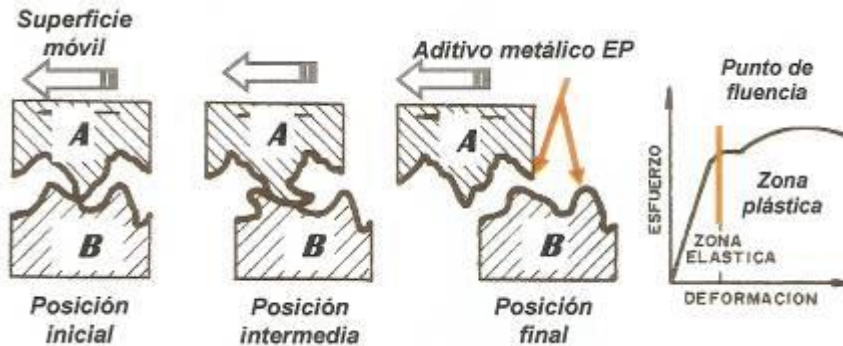
1.4.3 Elastohidrodinámica (EHL)

“La lubricación Elastohidrodinámica relaciona el flujo de aceite, la deformación elástica de las superficies metálicas, el aditivo metálico EP, y el aumento de la viscosidad del aceite con la presión. La deformación elástica de las superficies en contacto es varias veces la magnitud del espesor mínimo de la película lubricante (h_0).¹⁰ Es decir, que bajo este régimen las rugosidades nunca se separan realmente sino que se deforman elásticamente todo el tiempo: de allí el *elasto* de su nombre. Mientras que en la zona de contacto se crea una “superficie plana suficientemente grande como para permitir la formación de una película totalmente *hidrodinámica*, siempre que la velocidad relativa de deslizamiento sea lo suficientemente elevada.”¹¹ Debido al espesor de la película lubricante presente en este tipo de lubricación, entre 3 y 2 μm , los mecanismos son más susceptibles al desgaste erosivo y abrasivo.

¹⁰ Albarracín Aguillón, Pedro Ramón. Tribología y Lubricación. Cap. 2 Tribología

¹¹ Norton Robert L., Diseño de Maquinas. Cap. 10

Figura 6. Lubricación Elasto Hidrodinámica (EHL) Deformacion de crestas

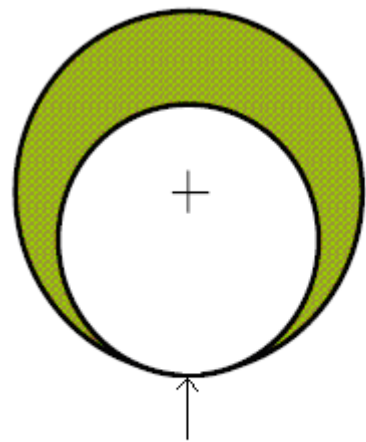


Fuente: Albarracín, Pedro Ramón "TOMO I Tribología y lubricación" 2013

1.4.4 Hidrostática

Cuando se tienen dos superficies estacionarias altamente cargadas y evidentemente en contacto, la única opción es bombear un fluido (aceite, agua o aire) para separar dichas superficies y así evitar el desgaste adhesivo en el momento de arranque. A esto se le conoce como lubricación hidrostática, es poco común e incluso se le conoce como una HD artificial. Dependiendo de si en la velocidad de operación se logran o no condiciones de HD se podrá apagar la bomba o no.

Figura 7. Lubricación Hidrostática



Lubricación hidrostática, durante el arranque. El aceite se introduce a presión para elevar el rotor

Fuente: Lubricación en motores alternativos de gas Disponible en:
<http://mantenimientoindustrial.wikispaces.com/Lubricaci%C3%B3n+en+motores+alternativos+de+gas> 2-11-13

1.5 LUBRICANTES

Lubricante se define como una sustancia (sólida, líquida, gaseosa) que se introduce entre dos superficies en movimiento relativo, con el fin de disminuir el rozamiento y evitar que haya rotura de los picos de rugosidad. También hay quienes definen al lubricante como una sustancia (sólida, líquida, gaseosa) que disminuye la fricción del mecanismo al reemplazar la fricción existente por la fricción interna que es mucho menor.¹² Al lubricante lo componen su base lubricante y puede llevar o no los diferentes aditivos.

1.5.1 Lubricantes (Bases) Minerales

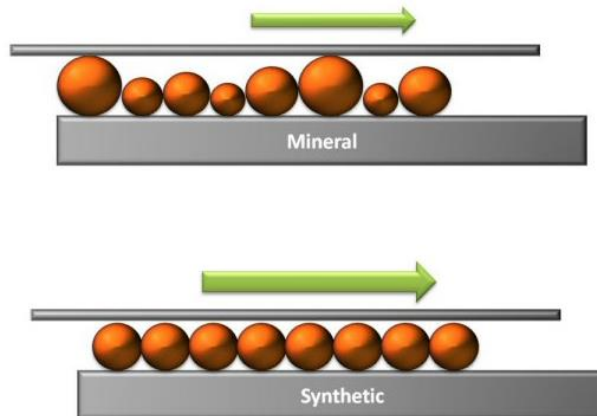
Son el resultado del proceso de destilación del crudo y están constituidos en su mayoría por compuestos parafínicos aunque también tienen compuestos nafténicos y aromáticos quienes aportan poder disolvente y buenas propiedades a bajas temperaturas, entre otros.

1.5.2 Lubricantes (Bases) sintéticos

Son constituidos por compuestos químicos o petroquímicos, tienen una vida útil mucho mayor y generan menos lodos o lacas. Entre sus ventajas están un mayor IV, mayor estabilidad térmica y a la oxidación, menor volatilidad y además son más homogéneos en su estructura interna. Aunque son más caros que los minerales llegan a dar prestaciones que compensan dicha inversión.

¹² ·Definición de lubricante, <http://es.wikipedia.org/wiki/Lubricante>, visitado 2-11-13

Figura 8. Homogeneidad de estructura de bases lubricantes



Fuente: "Lubricantes semi-sintéticos para motores" Disponible en:
http://www.lubrilandia.com.ar/Valvoline/gama_de_productos/automotrices/aceites_lubricantes_semisinteticos_motores.htm 10-11-13

Tabla 1. Prestaciones de Lubricantes Minerales Vs. Sintéticos

ACEITES SINTÉTICOS (A base de compuestos químicos o petroquímicos)			
	ACEITES MINERALES (a base de petróleo crudo)	P.A.O.	Ésteres
Propiedades a alta temperatura	☞☞	☞☞☞	☞☞☞
Propiedades a baja temperatura	☞	☞☞☞	☞☞☞
Índice de viscosidad	☞☞	☞☞☞	☞☞☞☞☞
Volatilidad	☞☞	☞☞☞	☞☞☞
Solubilidad de los aditivos	☞☞☞☞	☞☞	☞☞☞☞☞
Biodegradabilidad	☞☞	☞	☞☞☞☞

P.A.O.: poli-alfa-olefina

Fuente: Tips para el usuario. Disponible en:
<http://www.gulfoilvenezuela.com/lubricante-mineral-sintetico-semi-sintetico.aspx>

2-11-13

1.5.3 Viscosidad e índice de viscosidad (IV)

La viscosidad es una medida de la resistencia de un fluido al corte.¹³, es decir, que se refiere finalmente a una fricción existente dentro de las películas mismas del lubricante y a su constitución. Esta es una de las principales características de un lubricante ya que es la encargada de que se mantenga la película lubricante en todo momento durante el funcionamiento del mecanismo a lubricar. La viscosidad varía en forma inversa a la temperatura y en forma directa a la presión, ambos de manera no lineal.¹⁴ Esto indica que según las condiciones de operación se deben asegurar todas las condiciones optimas para una correcta lubricación. Y no se debe pasar por alto que la viscosidad está definida en su normatividad a una determinada temperatura cualquiera sea la norma. Es acá donde se hace importante el índice de viscosidad IV. El índice de viscosidad se puede definir como la medida de la variación que tiene la viscosidad con respecto de un cambio de temperatura. Es decir, que tanto varía la viscosidad del lubricante con los cambios de temperatura que pueda haber durante la operación del mecanismo. Mientras mayor sea el valor del IV más estable será la viscosidad frente a cambios de temperatura. En otras palabras, entre más variables sean las condiciones de operación más necesario es el hecho de elegir aceites con IV alto.

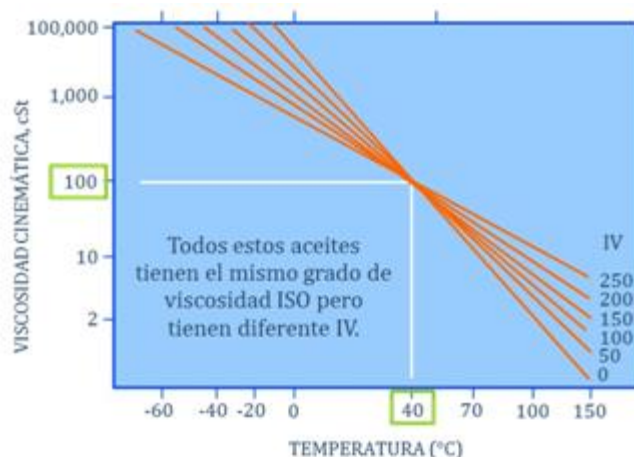
Se dice que no se deben usar lubricantes con $IV \leq 60$, si $60 < IV \leq 80$ se considera bajo, si $80 < IV \leq 100$ se considera normal, si $100 < IV \leq 130$ se considera alto y si $130 < IV$ se considera muy alto.¹⁵

¹³ Norton, Robert L., Diseño de Maquinas. Cap. 10

¹⁴ Op. Cit. NORTON

¹⁵ Apuntes en clase “Mantenimiento Predictivo: Tribología”, Gerencia de Mantenimiento, ASEDUIS

Figura 9. Índice de viscosidad para un ISO 100.



Fuente: "No ignore el IV cuando seleccione un lubricante" Disponible en:

http://www.noria.mx/nla/index.php?option=com_content&view=article&id=492&Itemid=73 4-11-13

La anterior grafica nos muestra cómo a temperaturas extremas de operación, el índice de viscosidad es determinante para saber la viscosidad exacta de operación. Es evidente que entre mayor sea el IV se nota un menor cambio de la viscosidad con la variación de la temperatura.

1.5.4 Clasificación ISO

“El sistema ISO de viscosidad, que establece 18 grados de viscosidad, comprendidos entre 2 y 1500 cSt a 40°C, que cubre todo el intervalo posible desde el aceite de mínima viscosidad hasta el de máxima viscosidad, en lo que a productos líquidos de petróleo se refiere. Cada grado de viscosidad se designa por el número entero más cercano a su viscosidad cinemática media, expresada en centiStokes a 40°C, permitiendo una variación de $\pm 10\%$ de este valor y se basa en el principio de que la viscosidad cinemática media correspondiente a cada grado, debe ser aproximadamente 50% mayor que la correspondiente al grado anterior. No contempla características de calidad y

proporciona solamente información sobre la viscosidad cinemática a la temperatura establecida de 40°C.”¹⁶

Tabla 2. Clasificación ISO.

GRADO ISO	Viscosidad Cinemática C Media cSt@40°	Límites de Viscosidad cSt @ 40°C	
		Máxima	mínima
VG2	2.2	1.98	2.42
VG3	3.2	2.88	3.52
VG5	4.6	4.14	5.03
VG7	6.8	6.12	7.48
VG10	10.0	9.00	11.00
VG15	15.0	13.50	16.50
VG22	22.0	19.80	24.20
VG32	32.0	28.80	35.20
VG46	46.0	41.40	50.60
VG68	68.0	61.20	74.80
VG100	100.0	90.00	110.00
VG150	150.0	135.00	165.00
VG220	220.0	198.00	242.00
VG320	320.0	288.00	352.00
VG460	460.0	414.00	506.00
VG580	680.0	612.00	748.00
VG1.000	1000.0	900.00	1100.00
VG1.500	1500.0	1350.00	1650.00
VG2.200	2200.0	1980.00	2420.00
VG3.200	3200.0	2880.00	3520.00

Fuente: “Sistema ISO de clasificación según la viscosidad para aceites industriales.” Disponible en: <http://www.petrolob.net/index.php/sis-iso-de-clasif-segun-la-viscosidad-para-aceites-ind> 4-11-13

¹⁶ “Sistema ISO de clasificación según la viscosidad para aceites industriales” Disponible en: <http://www.petrolob.net/index.php/sis-iso-de-clasif-segun-la-viscosidad-para-aceites-ind> 4-11-13

1.5.5 Clasificación SAE

Esta clasificación es para aceites de motores y va de acuerdo a la norma SAE J300. “Esta tabla clasifica las viscosidades de acuerdo a su viscosidad cinemática a 100°C y en caso de aceites multigrados también se mide su bombeabilidad y resistencia al arranque en frío.”¹⁷

Tabla 3. Clasificación SAE

Viscosidad SAE	Arranque en Frío (cP)	Bombeabilidad en Frío (cP)	Mínima Cinemática (cSt)	Máxima Cinemática (cSt)	Cizallamiento en alta temperatura (cP)
0W	6,200 a -35°C	60,000 a -40°C	3.8	-	-
5W	6,600 a -30°C	60,000 a -35°C	3.8	-	-
10W	7,000 a -25°C	60,000 a -30°C	4.1	-	-
15W	7,000 a -20°C	60,000 a -25°C	5.6	-	-
20W	9,500 a -15°C	60,000 a -20°C	5.6	-	-
25W	13,000 a -10°C	60,000 a -15°C	9.3	-	-
20	-	-	5.6	9.3	2.6
30	-	-	9.3	12.5	2.9
40	-	-	12.5	16.3	2.9 (0W-4-, 5W-40, 10W-40)
40	-	-	12.5	16.3	3.7 (15W-40, 20W-40, 24W-40, 40 monogrado)
50	-	-	16.3	21.9	3.7
60	-	-	21.9	26.1	3.7

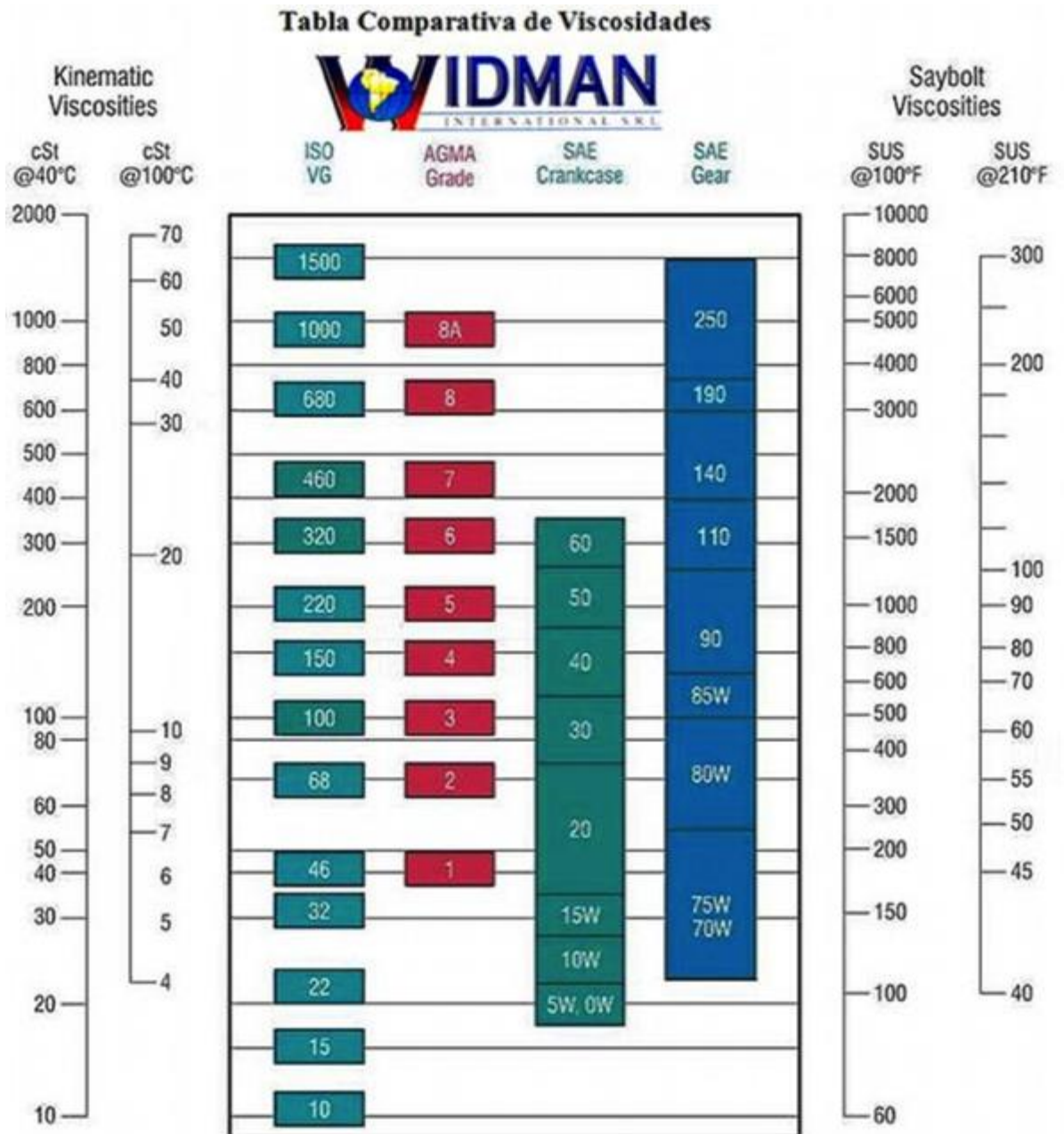
Fuente: WIDMAN INTERNATIONAL, SAE J300 Disponible en: <http://www.widman.biz/Seleccion/j300.html>

4-11-13

¹⁷ WIDMAN. SAE J300. Disponible en: <http://www.widman.biz/Seleccion/j300.html> 4-11-13

La equivalencia de viscosidades entre estas clasificaciones la podemos ver relegadas en el siguiente grafico.

Tabla 4. Tabla comparativa de viscosidades.



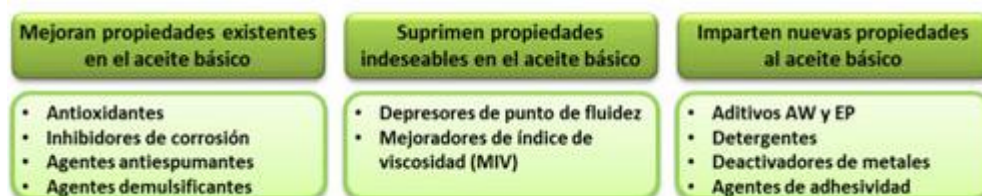
Fuente Widman International Disponible en: <http://www.widman.biz/Seleccion/j300.html> 4-11-13

1.6 ADITIVOS

“Los aditivos son compuestos orgánicos e inorgánicos, disueltos o suspendidos como sólidos en el lubricante. Típicamente fluctúan entre 0.1% a 30% del volumen total de lubricante, dependiendo de la aplicación que se le dará en la máquina.”¹⁸

A continuación se presenta una clasificación de los aditivos según su propósito.

Figura 10. Clasificación de aditivos.



Fuente: NORIA, “El crítico rol de los aditivos” . Disponible en:

http://www.noria.mx/nla/index.php?option=com_content&view=article&id=516&Itemid=73 2-11-13

1.6.1 Antioxidantes

Los lubricantes tienden a formar barnices o lodos de la reacción con el oxígeno y esto hace que pierda capacidad circulante y refrigerante. El propósito de estos aditivos es aumentar la vida útil del lubricante evitando situaciones indeseables.

1.6.2 Anticorrosivos y antiherrumbre

Previenen situaciones que desencadenen en cualquier tipo de corrosión. Funcionan generando una película hidrófoba que se adhiere a la superficie metálica.

¹⁸ Noria, “El crítico rol de los aditivos”. Disponible en:

http://www.noria.mx/nla/index.php?option=com_content&view=article&id=516&Itemid=73 2-11-13

1.6.3 Antiespumantes

Previene la formación de espuma en el lubricante que es causante de pérdida de la capacidad lubricante que además favorece la oxidación.

1.6.4 Demulsificante

Permiten crear y mantener una dispersión del aceite con el agua.

1.6.5 Depresores de punto de fluidez

Enfocado en mantener la viscosidad del aceite. Lo logran retardando la cristalización de parafinas existentes en el aceite.

1.6.6 Mejoradores de índice de viscosidad (MIV)

Su principal función es mantener el lubricante lo suficientemente fluido en frío y con viscosidad en caliente. Es decir, que mantenga sus condiciones físicas así varíe la temperatura del entorno.

1.6.7 AW y EP

Este tipo de aditivo funciona adhiriéndose a la superficie metálica de los elementos del sistema lubricado y su principal función es la de crear y mantener la capa límite de lubricante para que se desgaste primero dicha capa y no las superficies metálicas en movimiento. Actúan reduciendo el desgaste bajo condiciones de altas temperaturas y cargas (EP y Lubricación límite) y condiciones moderadas (AW y Lubricación mixta). Se dice que si se tiene un régimen de operación mayor a 450 rpm se deben emplear AW mientras que si el régimen es menor o igual a 450 rpm EP. Por lo general los aditivos EP son a base de cloro, boro, potasio, azufre y fósforo; mientras que los AW son a base de zinc.

En cuanto a los EP vale la pena aclarar que hay de primera, segunda y tercera generación. El uso de uno u otro va determinado en el factor de seguridad con el que deba trabajar el mecanismo, así como de la capacidad de soportar

presión: para los EP1 está entre 150 y 350 Kgf, EP2 está entre 350 y 750 Kgf y EP3 está entre 750 y 1350 Kgf.

1.6.8 Detergentes

Usado principalmente en aceites para motores de combustión interna para remover el hollín y que no se deposite en lugares indeseables. Ayuda a mantener la limpieza del motor.

1.6.9 Agentes de adhesividad

Aumenta la adherencia del lubricante evitando el goteo y salpicaduras durante la operación.

2. FRICCIÓN

La tribología es crucial para la maquinaria moderna que utiliza superficies rodantes y/o deslizantes. En la actualidad la gran mayoría de los países tienen pérdidas representativas de su PIB a causa de las pérdidas en forma de fricción debidas en gran parte al desconocimiento en tribología. Lo anterior da una idea de la importancia de reducir al máximo las pérdidas ocasionadas por fricción y desgaste que se traducen en ahorro económico y confiabilidad a largo plazo de los equipos.

2.1 FUERZA DE FRICCIÓN

La fuerza de fricción es realmente la oposición al movimiento de dos o más cuerpos y se da en todos los medios conocidos (sólidos, líquidos y gaseosos o una combinación de dos o más de ellos). Atendiendo a que las superficie de los cuerpos en contacto no son idealmente lisas es imposible desaparecer esta fuerza, que en unos casos resulta necesaria reducir y en otros aumentar, ya que la fricción es una fuerza con sentido contrario a la fuerza aplicada.¹⁹

La fricción conlleva a consumo de energía, generación de calor y desgaste. La fricción, como fuerza, se origina por las imperfecciones entre los objetos que mantienen contacto, las cuales pueden ser minúsculas, y generan un ángulo de rozamiento.

La fricción se define como fuerza de fricción (F), es negativa y se opone al movimiento y refleja que tanta energía mecánica se pierde cuando dos cuerpos inician el movimiento ó se mueven entre sí y es paralela y opuesta al sentido del movimiento. Refleja qué tan eficiente energéticamente es el mecanismo durante su funcionamiento. La fuerza de fricción se calcula a través de la siguiente ecuación:

¹⁹ Albarracín Aguillón, Pedro Ramón EGM, “Mantenimiento Predictivo” Cap.1 Pag. 5

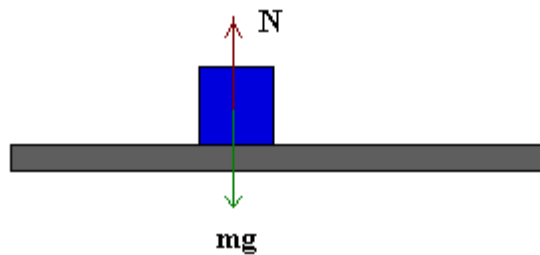
$$F=f \times W , \quad \text{Ecuación \#1}^{20}$$

F: Fuerza de fricción (Kgf)

f: coeficiente de fricción (Adimensional)

W: Fuerza normal que actúa sobre una de las superficies de fricción (Kgf)

Figura 11. Componentes de la fuerza de fricción



Fuente: Devia, Alfonso. Curso interactivo de Física. Disponible en:

http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/sedes/manizales/4070002/contenido/capitulo3_2.html 15-11-13

2.1.1 Fuerza de fricción estática (F_e)²¹

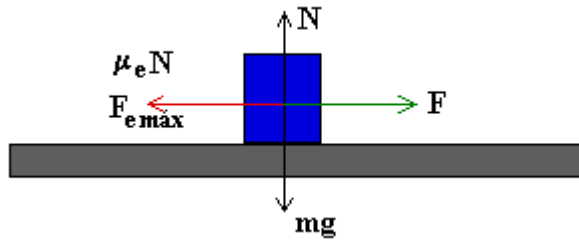
Existe una fuerza de fricción entre dos objetos que no están en movimiento relativo. Tal fuerza se llama *fuerza de fricción estática*. En la siguiente figura aplicamos una fuerza F que aumenta gradualmente, pero el bloque permanece en reposo. Como en todos estos casos la aceleración es cero, la fuerza F aplicada es igual y opuesta a la fuerza de fricción estática F_e , ejercida por la superficie.

²⁰ Albarracín Aguillón, Pedro Ramón EGM, “Mantenimiento Predictivo” cap1,pag 5

²¹ Devia, Alfonso. Curso interactivo de Física. Disponible en:

http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/sedes/manizales/4070002/contenido/capitulo3_2.html 15-11-13

Figura 12. Componentes de la fuerza de fricción estática



La máxima fuerza de fricción estática $F_{e \text{ máx}}$, corresponde al instante en que el bloque está a punto de deslizarse. Los experimentos demuestran que:

$$F_{e \text{ máx}} = \mu_e N, \quad \text{Ecuación \#2}$$

dónde la constante de proporcionalidad se denomina *coeficiente de fricción estática*. Por tanto, la fuerza de fricción estática varía, hasta un cierto límite para impedir que una superficie se deslice sobre otra:

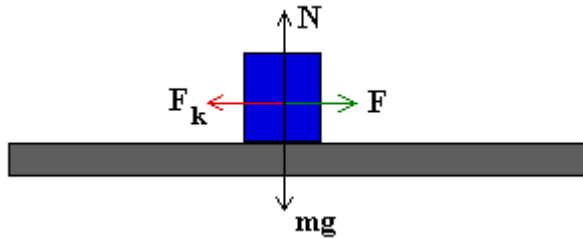
$$F_{e \text{ máx}} \leq \mu_e N :$$

2.1.2 Fuerza de fricción cinética (F_k)²²

En la siguiente figura se muestra un bloque de masa m que se desliza por una superficie horizontal con velocidad constante. Sobre el bloque actúan tres fuerzas: el peso mg , la fuerza normal N , y la fuerza de fricción F_k entre el bloque y la superficie. Si el bloque se desliza con velocidad constante, la fuerza aplicada F será igual a la fuerza de fricción F_k

²² Op.cit, DEVIA

Figura 13. Componentes de la fuerza de fricción cinética



Podemos ver que si duplicamos la masa m , se duplica la fuerza normal N , la fuerza F con que tiramos del bloque se duplica y por tanto F_k se duplica. Por tanto la fuerza de fricción cinética F_k es proporcional a la fuerza normal N .

$$F_k = m_k N, \text{ Ecuación \#3}$$

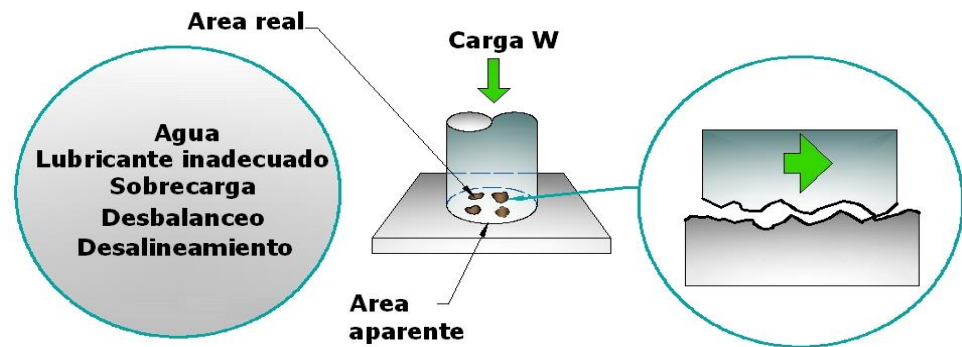
La constante de proporcionalidad m_k es un número adimensional denominado *coeficiente de fricción cinético*.

La fuerza de fricción cinética, entre dos cuerpos que se mueven entre sí se puede representar como:

- Fuerza de fricción metal-metal

Se presenta cuando la rugosidad de una superficie metálica desliza directamente sobre la otra y el sistema tribológico está constituido por dos cuerpos sólidos, entre los cuales no hay un tercer elemento sólido o fluido que los separe. Este tipo de fuerza de fricción ocasiona en la mayoría de los casos que las superficies de fricción de los componentes de la maquina se suelden y la falla sea catastrófica, debido a la gran cantidad de calor generado cuando las crestas altas y pequeñas chocan, se deforman elásticamente y luego plásticamente hasta fracturarse.

Figura 14. Fricción metal-metal

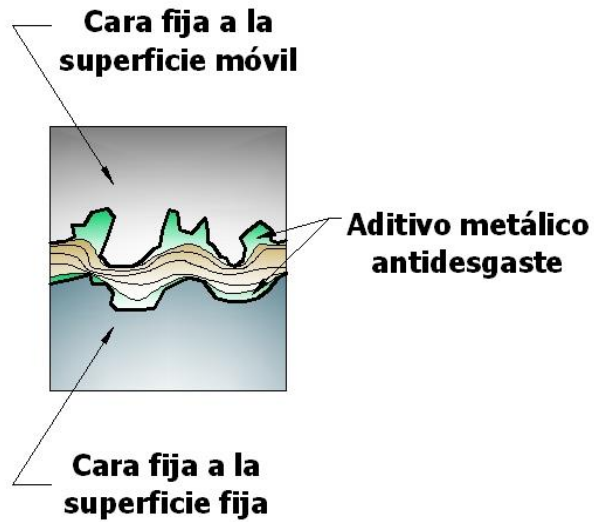


Fuente: "Tribología Aplicada a las máquinas", Albarracín Pedro.

- Fuerza de fricción sólida

Se presenta de manera transitoria siempre que las componentes de la máquina inician su movimiento o paran. Puede conllevar a altos niveles de desgaste adhesivo cuando la película lubricante es fluida y se rompe debido a condiciones mecánicas u operaciones anormales en el mecanismo lubricado.

Figura 15. Fricción sólida

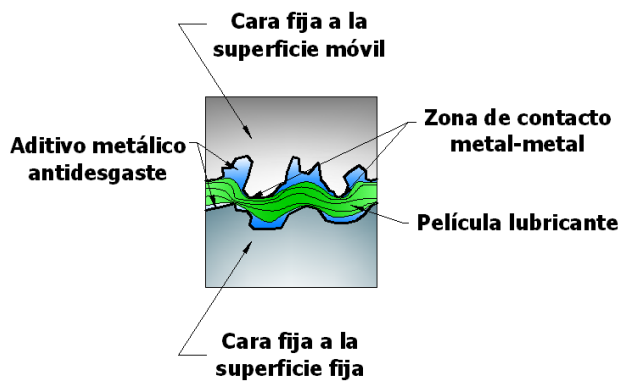


Fuente: "Tribología Aplicada a las máquinas", Albarracín Pedro.

- Fuerza de fricción mixta

Se presenta de manera permanente cuando los mecanismos lubricados de una máquina trabajan bajo condiciones de lubricación Elastohidrodinámica (EHL). La intensidad de la fuerza de fricción depende del tipo de aditivo de extrema presión y de las características del lubricante utilizado.

Figura 16. Fricción mixta

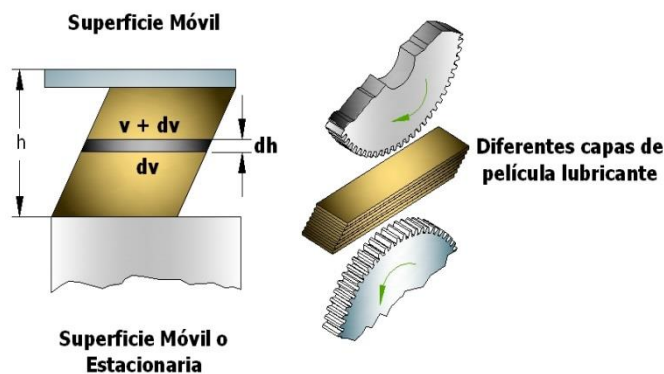


Fuente: "Tribología Aplicada a las máquinas", Albarracín Pedro.

- Fuerza de fricción fluida

Tiene lugar cuando las superficies de fricción se mueven la una con respecto a la otra completamente separadas por un tercer elemento que por lo regular es un fluido. La fuerza de fricción fluida cinética para un mismo espesor de película lubricante, depende de si el lubricante utilizado es mineral, sintético o vegetal.

Figura 17. Fricción fluida



Fuente: "Tribología Aplicada a las máquinas", Albarracín Pedro.

2.2 COEFICIENTE DE FRICCIÓN:

Expresa la oposición al deslizamiento que ofrecen las superficies de dos cuerpos en contacto. Es un coeficiente adimensional. Usualmente se representa con la letra griega μ (*mi*).

El valor del coeficiente de rozamiento es característico de cada par de materiales en contacto; no es una propiedad intrínseca de un material. Depende además de muchos factores como la temperatura, el acabado de las superficies, la velocidad relativa entre las superficies, etc. La naturaleza de este tipo de fuerza está ligada a las interacciones de las partículas microscópicas de las dos superficies implicadas

El coeficiente de fricción caracteriza la fuerza de fricción y es el parámetro modificable para reducir las pérdidas por fricción y hacer más productivo el desempeño mecánico de los componentes de las maquinas.

Tabla 5. Valores de coeficiente de fricción para aceites minerales y sintéticos, en diferentes mecanismos y condiciones de lubricación

Coeficiente de fricción										
Met al- met al f_{mm}	Sólido f_s		Mixto f_m						Fluido f_f	
			Primera Generación EP_1		Segunda Generación EP_2		Tercera Generación EP_3			
	Mine ral f_{sd}	Sintéti co f_{sr}	Mine ral f_{md}	Sintét ico f_{mr}	Mine ral f_{md}	Sintét ico f_{mr}	Mine ral f_{md}	Sintét ico f_{mr}	Mine ral f_{fd}	Sintét ico f_{fr}
Mecanismo										
1. Rodamiento rígido de bolas										
0,3 3	0,015	0,01 3	0,01 1	0,001 0	0,00 9	0,008	0,00 8	0,007	0,00 85	0,007 6
2. Rodamiento de bolas de contacto angular										
0,3 7	0,020	0,61 8	0,01 4	0,012	0,01 2	0,011	0,01 1	0,010	0,00 9	0,008
3. Rodamiento de bolas a rótula										
0,2 8	0,010	0,00 9	0,00 9	0,008	0,00 8	0,007	0,00 7	0,006	0,00 8	0,007 2
4. Rodamiento axial de bolas										
0,3 0	0,013	0,01 1	0,01 0	0,009	0,00 9	0,008	0,00 8	0,007	0,00 83	0,007 4
5. Rodamiento de rodillos cilíndricos										
0,2 8	0,011	0,00 9	0,00 9	0,008	0,00 8	0,007	0,00 7	0,006	0,00 81	0,007 2
6. Rodamiento de rodillos cónicos, esféricos y a rótula										
0,3 4	0,018	0,01 6	0,01 3	0,012	0,01 1	0,010	0,01 0	0,009	0,00 88	0,007 9
7. Rodamiento de agujas										
0,4 0	0,022	0,01 9	0,01 5	0,013	0,01 3	0,012	0,01 2	0,011	0,00 95	0,008 5
8. Cojinetes lisos										
0,4 5	0,060	0,05 4	0,03 4	0,030	0,03 0	0,027	0,02 8	0,025	0,00 8	0,007 2
9. Engranajes cilíndricos de dientes internos y externos, rectos y helicoidales										
0,4	0,045	0,04	0,02	0,024	0,02	0,022	0,02	0,020	0,01	0,009

2		0	7		4		2		0	
<i>10. Engranajes sinfín-corona</i>										
0,2 7	0,065	0,05 8	0,04 2	0,038	0,03 8	0,034	0,03 6	0,032	0,02 0	0,018
<i>11. Cadenas de rodillos de una hilera</i>										
0,3 5	0,080	0,07 0	0,01 0	0,009	0,00 9	0,008	0,00 8	0,007	NA	NA
<i>12. Acoples de cadena, rejilla y piñones</i>										
0,3 8	0,080	0,07 0	0,01 9	0,018	0,01 8	0,017	0,01 7	0,016	NA	NA
<i>13. Guías y cremalleras</i>										
0,4 0	0,090	0,08 0	0,02 0	0,010	0,01 0	0,009	0,00 8	0,007	NA	NA

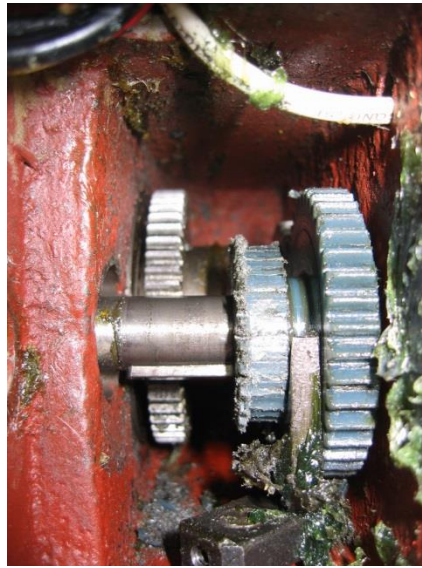
Fuente: Albarracín Aguillón, Pedro Ramón "Mantenimiento Predictivo" . EGM, cap1,pag 9

2.3 FALLA CATASTRÓFICA

La falla catastrófica se define como aquella condición en la cual el mecanismo de una máquina queda totalmente inservible por excesivo desgaste adhesivo, cambio de su forma geométrica ó desintegración de su estructura metálica. La falla catastrófica en cualquier elemento mecánico se presenta como resultado de un contacto metal-metal de muy alta intensidad entre las superficies de fricción del componente mecánico. Ver Figura No 4. Las causas que conllevan a que se presente la falla catastrófica son:

- Temperatura de operación superior a la máxima permisible.
- Viscosidad del lubricante inferior a la requerida.
- Bajo nivel de aceite.
- Aceite contaminado con agua, gases, combustible, etc.
- Sobrecargas por problemas operacionales ó mecánicos (desbalanceo, des alineamiento, etc).
- Valores de vibración por encima del valor normal.

Figura 18. Falla catastrófica en engranaje



Fuente: imágenes de falla catastrófica Disponible en:

https://www.google.com.co/search?sourceid=navclient&aq=&oq=falla+catastr&hl=es&ie=UTF-8&rlz=1T4ADFA_esCO484CO485&q=falla+catastrofica&gs_l=hp..0.0j0i5i30l2j0i8i30l2j41.0.0.4.3897878....0.GFdkwrL8uiE 28-10-13

3. DESGASTE

El desgaste es conocido desde que el ser humano comenzó a utilizar elementos naturales que le servían como utensilios domésticos.

Este fenómeno al igual que la corrosión y la fatiga, es una de las formas más importantes de degradación de piezas, elementos mecánicos y equipos industriales.

El desgaste puede ser definido como el daño superficial sufrido por los materiales después de determinadas condiciones de trabajo a los que son sometidos.

El desgaste de los mecanismos de las máquinas es inherente a cada uno de ellos, y se va presentando gradualmente a lo largo del tiempo, hasta que finalmente llega a un punto en el cual puede llegar a ser crítico haciendo que los mecanismos de las máquinas pierdan sus tolerancias y funcionen de una manera errática ó que fallen catastróficamente quedando inservibles y causando consecuentemente costosos daños y elevadas pérdidas en el sistema productivo de la empresa. El desgaste limita la *Vida Disponible*, V_d , y es imposible evitarlo ya que aun cuando se controlen las causas que lo originan, no será factible evitar la fatiga del material ya que ésta es una condición intrínseca de dicho material y conducirá a que finalmente el mecanismo se tenga que reemplazar. Los mayores índices de productividad de las máquinas se logran cuando los mecanismos que las constituyen se cambian por *desgaste normal* y no porque alguno de los diferentes tipos de desgaste que se pueden presentar durante su explotación llegó a una condición crítica. Se debe tener en cuenta que hoy en día *“el desgaste se puede controlar, más no es factible eliminarlo, con los materiales, diseño, lubricantes y tecnología actuales”*.²³

El desgaste es el daño de la superficie por remoción de material de una o ambas superficies sólidas en movimiento relativo. Es un proceso en el cual las capas superficiales de un sólido se rompen o se desprenden de la superficie. Al

²³ Albarracín Aguillón, Pedro Ramón “Mantenimiento Predictivo” . EGM, cap3,pag 26

igual que la fricción, el desgaste no es solamente una propiedad del material, es una respuesta integral del sistema. Los análisis de los sistemas han demostrado que 75% de las fallas mecánicas se deben al desgaste de las superficies en rozamiento. Se deduce fácilmente que para aumentar la vida útil de un equipo se debe disminuir el desgaste al mínimo posible.

3.1 TIPOS DE DESGASTE:

Una forma de evitar fallas catastróficas o controlar el desgaste progresivo en los componentes de las máquinas es determinando el tipo de desgaste al que se hallan sometidas las superficies.

El desgaste se puede presentar por varias causas:

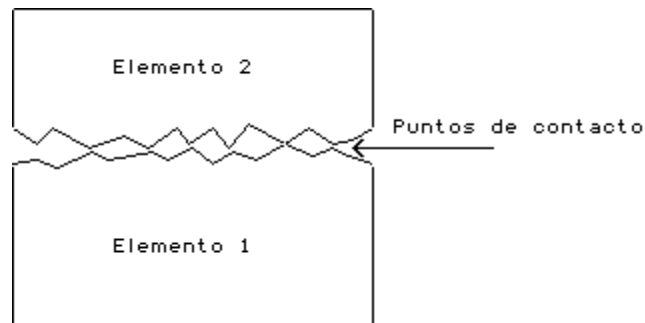
- Tipo de lubricante utilizado y a su tiempo de servicio.
- Contaminantes presentes en el aceite cuyo origen pueda ser de ellos mismos ó de fuentes externas.
- Fallas intempestivas del sistema de lubricación.
- Sobrecargas debidas a problemas mecánicos u operacionales.
- Selección incorrecta del equipo rotativo para el tipo de trabajo que va a desarrollar, a un mal diseño ó al empleo de materiales inadecuados para las condiciones de operación de la máquina.

Los tipos de desgaste más comunes en orden de importancia son:

3.1.1 Desgaste Adhesivo: Esta forma de desgaste se presenta cuando dos superficies en contacto metal-metal sometidas a fricción se deslizan una contra otra bajo presión, generando alto consumo de energía y elevadas temperaturas que conllevan a que las crestas de las superficies de fricción se suelden y fracturen.

El desgaste adhesivo es el más crítico ya que en la mayoría de los casos de lugar a la falla catastrófica del mecanismo lubricado quedando inservible y causando altas pérdidas en el proceso productivo.

Figura 19. Desgaste adhesivo entre dos piezas en movimiento



Fuente: Fuente: Tribología: Fricción, desgaste y lubricación Díaz Del Castillo, FELIPE 2007

- 3.1.2 Desgaste Erosivo: Es la pérdida lenta de material en las superficies de fricción de los mecanismos lubricados, como resultado de la contaminación del lubricante con partículas sólidas ó metálicas.
- 3.1.3 Desgaste Corrosivo: Es el deterioro de la superficie de fricción por la acción química de los ácidos resultantes del proceso de oxidación del aceite, de la contaminación de éste con agua ó con ácidos del proceso ó del medio ambiente.
- 3.1.4 Desgaste por Cavitación: Es el fenómeno que se presenta cuando las burbujas de vapor de agua que se forman en el aceite, al circula éste a través de una región donde la presión es menor que su presión de vapor, “explotan” al llegar nuevamente a una región de mayor presión como resultado del cambio de estado de vapor a líquido. Si las burbujas “explotan” cerca de las superficies metálicas darán lugar a presiones localizadas muy altas que ocasionarán picaduras en dichas superficies. La cavitación generalmente va acompañada de rudo y vibraciones. El desgaste por

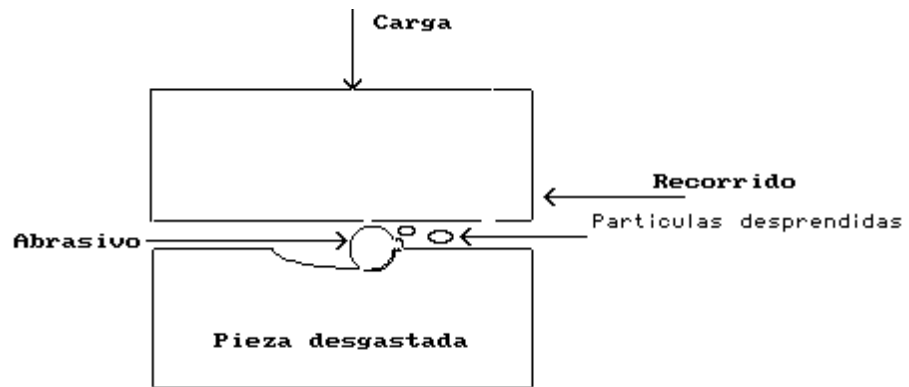
cavitación se puede evitar utilizando aceites con presiones de vapor bajas a altas temperaturas.

3.1.5 Desgaste por Corrientes eléctricas: Se presenta por corrientes eléctricas, cuyo origen puede ser corrientes parásitas u otras fuentes externas, que pasan a través de los mecanismos de un componente equipo lubricado y cuya puesta a tierra esta defectuosa ó no la tiene causando en ellos picaduras que los puede dejar inservibles. Este puede ser el caso de los rodamientos de los motores eléctricos y de los cojinetes lisos de turbinas de vapor, gas, hidráulicas, generadores y compresores centrífugos.

3.1.6 Desgaste Por Fatiga superficial: Se presenta como resultado de la disminución del factor de seguridad de la película (λ) por debajo el rango confiable. Es el resultado de esfuerzos cíclicos entre las asperezas de dos superficies en contacto.

3.1.7 Desgaste Abrasivo: Es consecuencia de la presencia de partículas sólidas y metálicas de un tamaño igual ó mayor que el espesor mínimo de la película lubricante y de la misma dureza ó mayor a la de las superficies metálicas del mecanismo lubricado.

Figura 20. Desgaste debido a la presencia de partículas duras



Fuente: Tribología: Fricción, desgaste y lubricación Díaz Del Castillo, FELIPE 2007

3.2 CONSECUENCIAS DEL DESGASTE²⁴

- Mayor consumo de energía para realizar la misma cantidad de trabajo útil.
- Altos valores de vibración e incremento en los niveles de ruido
- Pérdida de tolerancia y ajuste de los mecanismos.
- Superficies de fricción irregulares.
- Altas temperaturas de operación.
- Elevados costos de mantenimiento por repuestos y mano de obra.
- Mayor consumo de lubricantes y mano de obra.
- Pérdidas de producción por paro de máquinas.
- Posibilidad de accidentes ante el peligro de rotura de piezas.

²⁴ Albarracín Aguillón Pedro Ramón, EGM "Mantenimiento Predictivo" Pág. 31

3.3 CONTROL DE LOS DIFERENTES TIPOS DE DESGASTE

- Selección de la máquina de acuerdo con el proceso productivo.
- Uso de repuestos originales.
- Operación de acuerdo a las instrucciones del fabricante.
- Utilización de los lubricantes recomendados por el fabricante.
- Monitoreo de las variables operacionales, mecánicas y de lubricación.
- Mantenimiento y lubricación predictiva.
- Ejecución a tiempo de las órdenes de trabajo.
- Capacitación y certificación del personal de operaciones, mantenimiento y lubricación.

3.4 EFECTO DE LA RUGOSIDAD EN EL DESGASTE DE LOS MECANISMOS

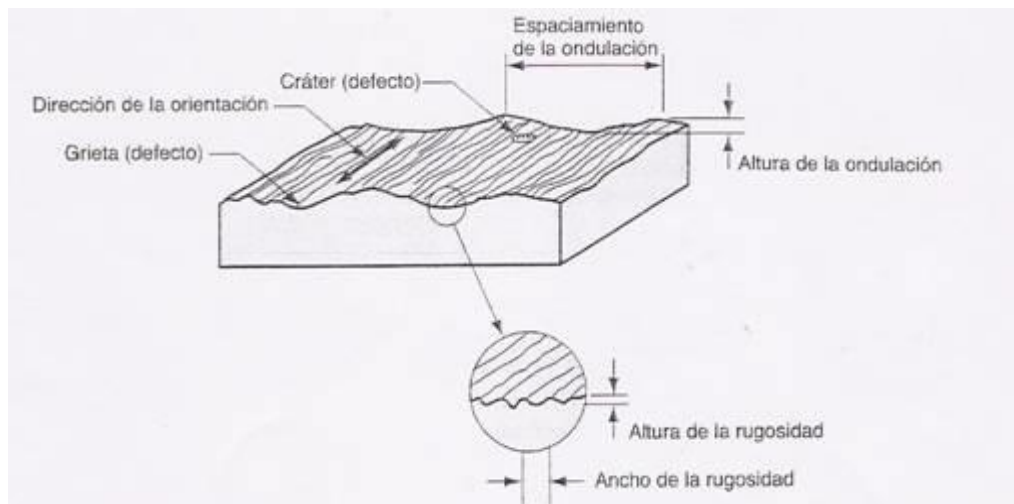
La rugosidad juega un papel decisivo en el nivel de desgaste que se puede presentar en los mecanismos lubricados, en el momento de la puesta en marcha, en la parada y cuando las condiciones de lubricación son del tipo EHL. Cuando un mecanismo se encuentra en reposo, las rugosidades de las dos superficies metálicas interactúan y las crestas más altas se introducen en los valles de las otras, dando lugar a que en la puesta en marcha, al desgastarse la película límite conformada por el aditivo anti desgaste o extrema presión, el desgaste adhesivo sea más crítico entre más irregulares sean las rugosidades de las dos superficies. En la práctica dicho desgaste adhesivo depende del tamaño, forma y concentración de las crestas y valles de las rugosidades.²⁵

²⁵ Albarracín Aguillón, Pedro Ramón, EGM, "Mantenimiento Predictivo" Cap. 4, pág. 32-33,34.

3.5 RUGOSIDAD

Una superficie perfecta es una abstracción matemática, ya que cualquier superficie real, por perfecta que parezca, presentará irregularidades que se originan durante el proceso de fabricación. Las irregularidades menores (micro geométricas) son la ondulación y la rugosidad. La primera pueden ocasionarla la flexión de la pieza durante el maquinado, falta de homogeneidad del material, libración de esfuerzos residuales, deformaciones por tratamiento térmico, vibraciones, etcétera; la segunda la provoca el elemento utilizado para realizar el maquinado, por ejemplo, la herramienta de corte o la piedra de rectificado. La rugosidad (es la huella digital de una pieza) son irregularidades provocadas por la herramienta de corte o elemento utilizado en su proceso de producción, corte, arranque y fatiga superficial.²⁶

Figura 21. Rugosidad en metales



Fuente: Mayorga, Jose C. Acabados Superficiales. Disponible en:
<http://www.monografias.com/trabajos70/acabados-superficiales-normas-simbologia/acabados-superficiales-normas-simbologia2.shtml> 5-11-13

La rugosidad de las superficies metálicas se identifica mediante el símbolo griego σ (sigma) y el promedio geométrico de las rugosidades de las dos superficies que se mueven la una con respecto a la otra se denomina σ_p (sigma promedio).

²⁶ Todo Ingeniería Industrial, "Rugosidad". Disponible en:
<http://todoingenieriaindustrial.wordpress.com/metrologia-y-normalizacion/rugosidad/> 5-11-13

La forma, altura y longitud de onda de las crestas de las rugosidades de las superficies metálicas sometidas a fricción, juegan un papel decisivo en la fatiga superficial y en el desgaste adhesivo de dichas superficies cuando el mecanismo se pone en operación, en el consumo de energía por fricción en el caso de la lubricación Elastohidrodinámica (EHL), y en los mecanismos que trabajan bajo condiciones de lubricación hidrodinámica, en el cálculo del espesor de la película lubricante (h_o), ya que entre más altas sean las crestas mayor será el espesor de dicha película lubricante, mayor la viscosidad (grado ISO) y por lo tanto, más alto será el consumo de energía por fricción fluida. En la práctica la rugosidad (σ) de las rugosidades de dos superficies sometidas a fricción se promedia y se trabaja con lo que se denomina la rugosidad promedio de las dos superficies (σ_p). La relación entre h_o y la σ_p se conoce con el nombre de factor de seguridad de la película *lubricante* λ (lambda).

$$\lambda = h_o / \sigma_p. \text{ Ecuación \# 4}$$

λ : Factor de seguridad de la película lubricante (adimensional)

h_o : Espesor de la película lubricante (micras)

σ_p : Promedio geométrico de las rugosidades de las dos superficies en movimiento relativo(micras).

El σ_p se calcula de la siguiente ecuación

$$\sigma_p = (\sigma_1^2 + \sigma_2^2)^{1/2}, \mu\text{m}, \text{ Ecuación \# 5}$$

Donde:

σ_1 : Rugosidad promedio de la superficie de fricción 1, μm (μpulg).

σ_2 : Rugosidad promedio de la superficie de fricción 2, μm (μpulg)

3.5.1 Tipos de Rugosidad

En el mecanizado de las superficies sometidas a fricción se obtienen básicamente dos tipos de rugosidades, las cuales dependen del tipo de mecanismo, las condiciones de lubricación (fluida o EHL) y de las condiciones operacionales bajo las cuales va a estar sometido dicho mecanismo.

3.5.1.1 Agudas

Se caracterizan por que su forma es triangular y la altura de las crestas y longitud de onda es aproximadamente igual.

3.5.1.2 Dentadas

Tienen la forma de dientes de engranajes y generan un menor consumo de energía en el momento de la puesta en marcha por que las crestas se entrelazan menos.

4. PROPUESTA DEL PLAN DE AHORRO

En una economía globalizada como la nuestra inmersa en un mercado competitivo, bajar los costos de producción, incrementar la productividad en los procesos y mejorar la calidad de los productos se convierte en una necesidad imperiosa para garantizar la permanencia en el tiempo de las empresas.

Bajo esta perspectiva, el presente trabajo estudiará cómo mediante el control de los diferentes fenómenos de fricción a los que se hallan sometidos los mecanismos de las maquinas es posible disminuir los costos de operación por menor consumo de energía, disminuir los costos de mantenimiento y pérdidas de producción al disminuir los paros en los equipos.

La fricción es tan peligrosa que aun utilizando un lubricante, si este no es el adecuado, el mecanismo dentro de un proceso más lento termina dañándose. La fricción tal y como la conocemos hoy en día en las máquinas se puede controlar y aún reducir mediante la utilización eficiente de la lubricación. El gran desarrollo en esta materia permite formar películas más eficientes y resistentes al desgaste, con menores esfuerzos a la cizalladura que conllevan a reducir el desgaste en los mecanismos y el consumo de energía.

Una de las condiciones más críticas en la operación de un mecanismo es el momento en que se pone en marcha, pues las crestas de las rugosidades de las dos superficies tienden a entrelazarse y su separación dependerá de las características de untuosidad o de las propiedades anti desgaste del lubricante que se esté utilizando. Esta característica del lubricante forma una capa que se conoce como película límite la cual aísla las dos superficies metálicas permitiendo junto con la elasticidad del material que en el momento de la puesta en marcha del mecanismo las rugosidades se deformen elásticamente y pasen deslizándose las unas con respecto a las otras sin soldarse.

La eficiencia de un buen lubricante para condiciones de película límite depende de la velocidad de sus compuestos de untuosidad o de sus aditivos anti

desgaste con las superficies metálicas, del espesor de la película límite y de su coeficiente de fricción sólida.

Por lo anterior, se vuelve de gran importancia y trascendencia la correcta selección del lubricante a utilizar en los diferentes mecanismos que se operan a diario. Frente a este hecho cabe decir que hoy en día en la industria es muy poco el conocimiento frente a los temas anteriormente ilustrados, tanto del comprador como del proveedor. Esto conlleva a una lubricación ineficiente y costosa que puede ser reevaluada y reemplazada por lubricantes sintéticos de mejores prestaciones y menores impactos ambientales. Es decir, que se pretende generar conciencia frente a la lubricación y a su correcta implementación. Finalmente, hay que aclarar que se hizo para equipos rotativos con cargas altas y bajas velocidades que es donde más difícil se logra una correcta lubricación.

4.1 PASOS

4.1.1 Identificación de parámetros y condiciones

El primer paso es reunir toda la información necesaria y útil para poder realizar el análisis y la comparación de las diferentes alternativas. Debemos tener a la mano lo siguiente:

- Temperatura de operación del sistema tribológico

Es determinante a la hora de la elección del lubricante ya que es el parámetro a tener en cuenta para analizar el IV y su importancia para cada aplicación.

- Velocidad

Es necesaria para efectuar los cálculos de consumo de energía además de dar idea del régimen de lubricación.

Si $n > 450 \text{ rpm}$ se presentará Lubricación HD y se asume fricción fluida, mientras que si $n \leq 450 \text{ rpm}$ se presentará lubricación EHL.²⁷

- Lubricante usado
 - IV: dependiendo de la temperatura real de operación y el lubricante utilizado, se vuelve más o menos importante en la selección del mismo.
 - Viscosidad real: lo ideal es poder determinar este valor para el lubricante a condiciones de operación para poder buscar mas acertadamente un reemplazo: un lubricante sintético el cual puede dar entre otras, un ahorro de consumo de energía debido a menores perdidas por fricción.

- Costo de Kw-Hr

Con este valor podemos calcular el ahorro por año para un cambio de lubricante utilizado.

- Régimen de producción

Debemos saber cuánto tiempo trabaja realmente el mecanismo para poder establecer valores reales de ahorro.

²⁷ Apuntes en clase “Mantenimiento Predictivo: Tribología”, Gerencia de Mantenimiento, ASEDUIS

- Coeficiente de fricción

Varía según su condición (fricción sólida, mixta, etc.) y según el elemento de análisis (rodamiento, engranaje, etc.) Ver Tabla 5.

- Régimen de lubricación

“A nivel práctico, se considera que un mecanismo trabaja bajo condiciones de película fluida, si el fabricante del equipo no recomienda para su lubricación, lubricante con aditivos EP y EHL si los recomienda.”²⁸

4.1.2 Cálculo del consumo de energía por fricción

- Consumo de energía en rodamientos

$$CE_f = 5,14 \times 10^{-6} * f * w * d * n \quad [Kw]$$

Ecuación # 6

Donde:

f: coeficiente de fricción del lubricante, adimensional

W: carga, Kg

d: diámetro interior del rodamiento, cm

n: velocidad, rpm

- Consumo de energía en cojinetes lisos

$$CE_f = 0,03077 * f * w * d * n \quad [Kw]$$

Ecuación # 7

²⁸ Albarracín Aguillón Pedro EGM, “Mantenimiento Predictivo” Pág. 21

f: coeficiente de fricción del lubricante, adimensional

W: carga, Kg

d: diámetro interior del rodamiento, m

n: velocidad, rps

- Consumo de energía de reductores de velocidad

$$CE_f = 0,7357P(1 - e_t) \quad [CV]$$

Ecuación # 8

Donde:

P: potencia, CV

e_t : eficiencia total de la transmisión, adimensional

4.1.3 Elección de alternativa

Una de las principales motivaciones del programa es la de empezar a utilizar, en la industria, lubricantes sintéticos de nueva generación, los cuales exhiben mejores condiciones debido a su proceso de obtención lo cual se traduce en mejores prestaciones en términos generales. Esto finalmente conlleva al ahorro económico al que le ha apostado el programa. Al ya tener plenamente identificada la aplicación, simplemente se debe escoger un lubricante homólogo sintético y realizar los cálculos de consumo de energía con los nuevos valores correspondientes al lubricante sintético.

4.1.4 Cálculo nuevo y comparación

Ejemplo 1²⁹

En los 24 cojinetes lisos que soportan los cilindros de secado de un *Molino Papelero* se está utilizando, por recomendación del fabricante, un aceite mineral de grado ISO 220 con aditivos Extrema Presión de 1ra generación (EP₁). El diámetro del eje de cada cilindro de secado es de 20 cm y la velocidad de 40 rpm; la carga total dinámica (debida al torque) que actúa sobre cada uno de los cojinetes lisos es de 1500 kgf. El *Molino Papelero*, opera durante 7500 horas al año y los cojinetes lisos se lubrican por circulación.

Se requiere calcular:

- El *Consumo de Energía por Fricción* (CE_f) en cada cojinete liso al utilizar el aceite mineral con aditivos de EP₁.
- El *Ahorro Económico por Menor Fricción* (ACE_f), en dólares en los 24 cojinetes lisos del *Molino Papelero* al cambiar el aceite utilizado por un sintético con aditivos EP₂ (2da generación). El valor del kw-hr es de U\$0,080.

Solución:

Del enunciado del problema se concluye que los 24 cojinetes lisos de apoyo de los cilindros de secado del *Molino Papelero* trabajan bajo condiciones de lubricación EHL como resultado de la utilización de un aceite con aditivos de EP₁, recomendado por el fabricante del *Molino Papelero*.

²⁹ Albarracín, Pedro Ramón “TOMO I Tribología y lubricación” 2013

- Consumo de Energía por Fricción (CE_f):

El Consumo de Energía por Fricción (CE_f) en cada cojinete liso del *Molino Papelero* al utilizar el aceite mineral con aditivos de EP₁, se calcula de la Ecuación No2.4, Tabla No2.2:

$$CE_f = 5,13 \times 10^{-6} f_{md} W_d d_{eje} n = 5,13 \times 10^{-6} \times 0,010 \times 1500 \text{ kgf} \times 20 \text{ cm} \times 40 \text{ rpm} = 0,061 \text{ kw}$$

$$CE_f = 0,061 \text{ kw}$$

Donde:

De la *Tabla 2.1* para cojinetes lisos, condiciones de lubricación EHL y aceite mineral con aditivos EP₁ (1ra generación) se tiene que $f = f_{md} = 0,010$; $W_d = 1500 \text{ kgf}$; $d_{eje} = 20 \text{ cm}$; $n = 40 \text{ rpm}$.

- Ahorro Económico por Menor Fricción (ACE_f),

El Ahorro Económico por Menor Fricción (ACE_f), en dólares, para los 24 cojinetes lisos del *Molino Papelero*, al cambiar el aceite mineral con aditivos EP₁ (1ra generación) por un aceite sintético, con aditivos EP₂ (2da generación), se calcula nuevamente de la Ecuación 2.4, tabla No2.2, $CE_f = 5,13 \times 10^{-6} f_m W_d n$, pero teniendo en cuenta que f_m es la diferencia entre el coeficiente de fricción mixta del aceite mineral con aditivos EP₁ y el del aceite sintético con aditivos EP₂ respectivamente; por lo tanto se tiene que el ahorro de energía con un lubricante con aditivos de EP₂ (2da generación) es de:

$$ACE_f = 5,13 \times 10^{-6} \times (0,010 - 0,009) \times 1500 \text{ kgf} \times 20 \text{ cm} \times 40 \text{ rpm} \times 24 \text{ cojinetes lisos} \times 7500 \text{ horas de operación/año} \times \text{U\$0,080/kw} \cdot \text{hr} = \text{U\$88,64/año.}$$

$$ACE_f = \text{U\$88,64/año}$$

Por lo tanto el ahorro económico en los 24 cojinetes lisos del Molino Papelero, al reemplazar el aceite mineral con aditivos EP₁ (1ra generación) por uno sintético con aditivos EP₂ (2da generación), es de U\$88,64 dólares al año.

Ejemplo 2³⁰

Un reductor de velocidad está constituido por dos pares de engranajes cilíndricos de dientes helicoidales y cada uno de los tres ejes está apoyado en dos rodamientos de rodillos cónicos. El aceite que se está utilizando es mineral con aditivos de EP₁ (1ra generación) y es salpicado por los engranajes que van montados en los ejes intermedio y de salida. La potencia en el eje de entrada al reductor de velocidad es de 100 kw; los piñones y engranajes trabajan bajo condiciones de lubricación Elastohidrodinámica (EHL) y los rodamientos Hidrodinámica (HD). El reductor de velocidad trabaja 8000 horas/año.

Se requiere calcular:

- El Consumo de Energía por Fricción (CE_f) al utilizar el aceite mineral con aditivos de EP₁ (1ra generación).
- El Ahorro Económico por Menor Fricción (ACE_f), en dólares al utilizar un aceite sintético con aditivos EP₃ (3ra generación). El valor del kw-hr es de U\$0,080.

³⁰ Albarracín, Pedro Ramón "TOMO I Tribología y lubricación" 2013

Solución:

- Consumo de Energía por Fricción (CE_f) al utilizar el aceite mineral con aditivos de EP₁ (1ra generación).

El Consumo de Energía por Fricción (CE_f) en los diferentes mecanismos del reductor de velocidad, al utilizar el aceite mineral con aditivos de EP₁ (1ra generación), se calcula de la *Ecuación 2.6, Tabla 2.1*:

$$CE_f = 100\text{kw} \times (1 - 0,948) = 5,20 \text{ kw}$$

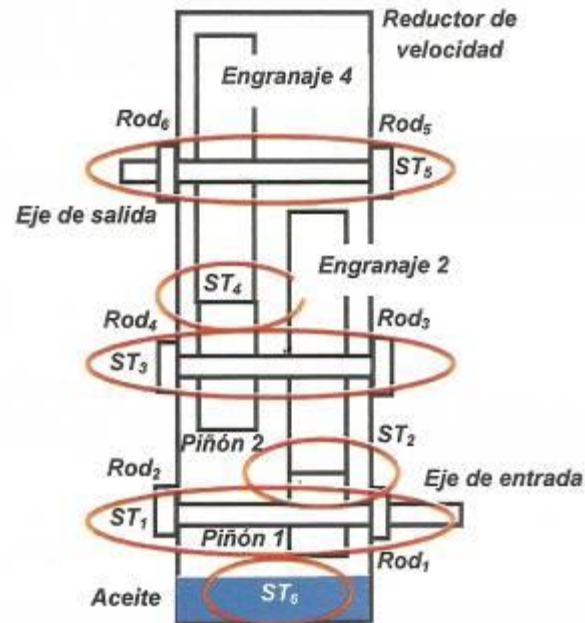
$$CE_f = 5,20 \text{ kw}$$

Donde:

$$P = 100 \text{ kw y } e_t = 0,948.$$

Para calcular la e_t , es necesario en primer lugar, identificar los Sistemas Tribológicos (ST) del reductor de velocidad:

Figura 22 Sistemas tribológicos en un reductor de velocidad de tres ejes



Fuente: Albarracín Pedro ·Tomo I Tribología y lubricación” 2013

En este caso se tienen 6 sistemas Tribológicos (ST), y por lo tanto la eficiencia total es igual a:

$$e_t = e_{ST1} \times e_{ST2} \times e_{ST3} \times e_{ST4} \times e_{ST5} \times e_{ST6}, \text{ adimensional} = 0,996 \times 0,981 \times 0,996 \times 0,981 \times 0,996 \times 0,974 \times 0,998 = 0,948$$

$$e_t = 0,948$$

En este caso se tiene que:

$ST_1 = (e_{Rod1} + e_{Rod2})/2 = 0,9912$; donde $e_{Rod1} = e_{Rod2}$ (porque el rodamiento 1 es igual al 2) y es igual a: $1 - f_{fd} = 1 - 0,004 = 0,996$ (de la Tabla 2.1 con $f_{fd} = 0,004$ para rodamientos de rodillos cónicos, aceite mineral y lubricación HD); $ST_3 = (e_{Rod3} + e_{Rod4})/2 = ST_5 = (e_{Rod5} + e_{Rod6})/2 = 0,996$, porque los rodamientos 3 - 4

y 5 - 6 son iguales a los rodamientos 1 y 2 y la lubricación es HD; $ST_2 = ST_4 = 1 - f_{md}$ (porque son el mismo tipo de engranajes y la lubricación es EHL), y es igual a: $1 - 0,019 = 0,981$ (de la *Tabla 2.1* con $f_{md} = 0,019$ para engranajes cilíndricos de dientes helicoidales y aceite mineral con aditivos de EP₁ (1ra generación); $ST_6 = 1 - f_e = 0,998$; $f = f_e$ se selecciona de la *Nota 2 de la Tabla 2.1*, y es igual a 0,002, para sistemas de lubricación por salpique.

- *Ahorro Económico por Menor Fricción (ACE_f)*

El consumo de energía por fricción (CE_f) con el aceite sintético es igual a:

$$CE_f = 100\text{kwx}(1 - 0,957) = 4,30 \text{ kw}$$

$$CE_f = 4,30 \text{ kw}$$

Donde:

$$P = 100 \text{ kw y } e_t = 0,957.$$

La eficiencia total, e_t , al utilizar aceite sintético con aditivos EP₃ es igual a:

$$e_t = e_{ST1} \times e_{ST2} \times e_{ST3} \times e_{ST4} \times e_{ST5} \times e_{ST6}, \text{ adimensional} = 0,997 \times 0,984 \times 0,997 \times 0,984 \times 0,997 \times 0,98 \times 0,998 = 0,957$$

$$e_t = 0,957$$

Donde:

En este caso se tiene que:

$ST_1 = (e_{Rod1} + e_{Rod2})/2 = 0,997$; donde $e_{Rod1} = e_{Rod2}$ (porque el rodamiento 1 es igual al 2) y es igual a: $1 - f_{fr} = 1 - 0,003 = 0,997$ (de la *Tabla 2.1 con $f_{fd} = 0,003$ para rodamientos de rodillos cónicos, aceite mineral y lubricación HD*); $ST_3 = (e_{Rod3} + e_{Rod4})/2 = ST_5 = (e_{Rod5} + e_{Rod6})/2 = 0,997$, porque los rodamientos 3 - 4 y 5 - 6 son iguales a los rodamientos 1 y 2 y la lubricación es HD; $ST_2 = ST_4 = 1 - f_{mr}$ (porque son el mismo tipo de engranajes y la lubricación es EHL), y es igual a: $1 - 0,016 = 0,984$ (de la *Tabla 2.1 con $f_{md} = 0,016$ para engranajes cilíndricos de dientes helicoidales y aceite mineral con aditivos de EP₁ (1ra generación)*); $ST_6 = 1 - f_e = 0,998$; $f = f_e$ se selecciona de la *Nota 2 de la Tabla 2.1*, y es igual a 0,002, para sistemas de lubricación por salpique.

El *Ahorro Económico por Menor Fricción* (ACE_f) al utilizar el aceite sintético de 3ra generación es igual a:

El ahorro económico por menor fricción (ACE_f) en dólares al utilizar un aceite sintético con aditivos de EP de 3ra generación, es igual a:

$$ACE_f = (5,20 \text{ kw} - 4,30) \text{kw} \times 8000 \text{ horas/año} \times \text{U\$}0,080/\text{kw-hr} = \text{U\$}576/\text{año}$$

$$ACE_f = \text{U\$}576/\text{año}$$

Por lo tanto el ahorro económico en el reductor de velocidad, al reemplazar el aceite mineral con aditivos EP₁ (1ra generación) por uno sintético con aditivos EP₂ (3ra generación), es de U\$576 dólares al año.

5. CONCLUSIONES

- ✓ El objetivo de la lubricación es reducir el rozamiento, el desgaste y el calentamiento de las superficies en contacto de piezas con movimiento relativo.
- ✓ El coeficiente de fricción es el parámetro más importante y modificable para reducir las pérdidas por fricción y hacer más productivo el desempeño mecánico de los componentes de las maquinas.
- ✓ En elementos de máquinas que trabajan bajo condiciones de lubricación EHL, es factible reducir y cuantificar el consumo de energía por fricción teniendo en cuenta la forma y tamaño de las rugosidades y el coeficiente de fricción EHL.
- ✓ La implementación de programas de lubricación en las empresas busca estudiar los diferentes fenómenos de la fricción que permitan determinar los valores de los coeficientes de fricción de los lubricantes que se estén utilizando y compararlos con otros lubricantes que puedan dar lugar a menor consumo de energía.
- ✓ La utilización de lubricantes de alta tecnología en equipos rotativos se traduce en beneficios económicos a las empresas pues disminuciones en los coeficientes de fricción sólida, fluida o combinada implica menor desgaste, menor consumo de repuestos, mayor confiabilidad y disponibilidad de los equipos y por tanto disminución de la mano de obra en el mantenimiento de los mismos.

- ✓ Generar conciencia entorno al tema de la lubricación y la tribología es una necesidad inmediata de la gran mayoría de la industria colombiana.

BIBLIOGRAFÍA

- "Sistema ISO de clasificación según la viscosidad para aceites industriales" Disponible en: <http://www.petrolub.net/index.php/sis-iso-de-clasif-segun-la-viscosidad-para-aceites-ind> Visitado: 20-10-31
- "Aceites bases y aditivos" Disponible en: http://www.lubricantes.elf.com/es/eself.nsf/VS_OPM/E930D9465C9D42BCC1256EE500474ED0?OpenDocument Visitado: 2-11-13
- "Aditivos Mejoradores de la adherencia" Disponible en: <http://es.aftonchemical.com/Solutions/LubricantComponents/Pages/TackinessAdditives.aspx> Visitado: 17-11-13
- "Desgaste de materiales" Disponible en: <http://www.utp.edu.co/~dhmesa/pdfs/desgaste.pdf> Visitado: 30-10-13
- "Lubricación en motores alternativos de gas" Disponible en: <http://mantenimientoindustrial.wikispaces.com/Lubricaci%C3%B3n+en+motores+alternativos+de+gas> Visitado: 2-11-13
- "Lubricantes semi-sintéticos para motores" Disponible en: http://www.lubrilandia.com.ar/Valvoline/gama_de_productos/automotrices/aceites_lubricantes_semisinteticos_motores.htm Visitado: 10-11-13
- "Rugosidad" Disponible en: <http://todoingenieriaindustrial.wordpress.com/metrologia-y-normalizacion/rugosidad/> Visitado: 5-11-13
- ALBARRACÍN AGUILLÓN Pedro Ramón, "Tribología Aplicada a las máquinas" Presentación ppt.
- ALBARRACÍN AGUILLÓN, Pedro EGM, "Mantenimiento Predictivo" 2013. ASEDUIS Bogotá

- ALBARRACÍN AGUILLON, Pedro Ramón. Tribología y lubricación. Litochoa. 1993
 - Albarracín, Pedro Ramón “TOMO I Tribología y lubricación” 2013
- Apuntes en clase “Mantenimiento Predictivo: Tribología”, Gerencia de Mantenimiento, ASEDUIS
- DE VITA Yiovanina, “Aditivos para lubricantes para motores a gasolina” Disponible en: <http://www.firp.ula.ve/archivos/cuadernos/S831B.pdf> Visitado: 10-11-13
- DEVIA, Alfonso. Curso interactivo de Física. Disponible en: http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/sedes/manizales/4070002/contenido/capitulo3_2.html Visitado: 15-11-13
- DIAZ DEL CASTILLO, Felipe Tribología: Fricción, desgaste y lubricación 2007
- Noria Corporation, “El crítico rol de los aditivos”. Disponible en: http://www.noria.mx/nla/index.php?option=com_content&view=article&id=516&Itemid=73 Visitado: 2-11-13
- Noria Corporation, “No ignore el índice de lubricación cuando seleccione un lubricante” Disponible en: http://www.noria.mx/nla/index.php?option=com_content&view=article&id=492&Itemid=73 Vistado: 28-10-13
- NORTON, Robert L., Diseño de Maquinas. Ed. Prentice Hall
- Tips para el usuario. Disponible en: <http://www.gulfoilvenezuela.com/lubricante-mineral-sintetico-semi-sintetico.aspx> Visitado: 2-11-13
- WIDMAN INTERNATIONAL, <http://www.widman.biz> Visitado: 4-11-13

- WIDMAN. SAE J300. Disponible en:
<http://www.widman.biz/Seleccion/j300.html> Visitado: 4-11-13