



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

FACULTAD DE QUÍMICA

## “FUNDAMENTOS DE TRIBOLOGÍA Y LUBRICACIÓN”

**INFORME DE LA PRÁCTICA PROFESIONAL  
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
INGENIERO QUÍMICO**

PRESENTA:  
**GILBERTO ANDRADE VIASCÁN**



MÉXICO, D.F.



**EXAMENES PROFESIONALES  
FACULTAD DE QUÍMICA** 2004



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Jurado Asignado:

Presidente: Prof. Ernesto Pérez Santana

Vocal: Prof. Alejandro Iñiguez Hernández

Secretario: Prof. Eduardo Marambio Dennet

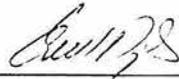
1er. Suplente: Prof. José Agustín Texta Mena

2o. Suplente: Prof. Maria Guadalupe Lemus Barajas

\*\*\*\*\*

Sitio donde se desarrolló el tema: Facultad de Química – UNAM

Asesor del Tema: IQ Ernesto Pérez Santana



Sustentante: Gilberto Andrade Viascán



## Agradecimientos

*Gracias a Dios, a mi Universidad y Facultad y a todos los maestros que brindaron su tiempo y parte de su vida en mi formación.*

\*\*\*\*\*

*En particular, deseo dedicar este trabajo a la memoria de las personas que me ayudaron a ser lo que soy. Mis abuelos: Wile, Loy, Abelardo y Camila, y mi madre Judith.*

\*\*\*\*\*

*A mi padre Gilberto, a mis hermanos Rosalía y Abelardo y a mis sobrinos: Pico, León y Oswaldo*

\*\*\*\*\*

*A mis amigos: Manuel y Rubén*

\*\*\*\*\*

*Y finalmente a mi esposa Violeta y a mis hijos Gibrán y Nash, ya que gracias al amor y cariño que ellos me brindan, tome fuerzas para realizar el presente trabajo.*

# “FUNDAMENTOS DE TRIBOLOGIA Y LUBRICACION”

## INTRODUCCION.

### 1 ) Importancia de la Tribología y la Lubricación en el mundo actual

### 2 ) Introducción a la Tribología

- 2.1 Definición e historia de la Tribología
- 2.2 Macrotribología y Nanotribología
- 2.3 Fricción.
- 2.4 El Sistema Tribológico.
- 2.5 Tipos de fricción.
- 2.6 Leyes de la fricción.
- 2.7 Coeficiente de fricción.
- 2.8 Desgaste.
- 2.9 Tipos de desgaste.
- 2.10 Medios para reducir la fricción y el desgaste.

### 3) Fundamentos de Lubricación

- 3.1 Breve historia comercial de los aceites lubricantes
- 3.2 Definición de lubricante
- 3.3 Características de la película lubricante
- 3.4 Premisas en la práctica de la lubricación.
- 3.5 Funciones de un lubricante
- 3.6 Factores que afectan el proceso de la lubricación
- 3.7 Teoría de la lubricación y Viscosidad
- 3.8 Regímenes de lubricación
  - 3.8.1 Lubricación hidrodinámica
  - 3.8.2 Lubricación elastohidrodinámica
  - 3.8.3 Lubricación de capa límite
  - 3.8.4 Lubricación mixta
  - 3.8.5 Lubricación hidrostática
  - 3.8.6 Curva de Stribeck.
- 3.9 Viscosidad
  - 3.9.1 Viscosidad Absoluta ó Dinámica
  - 3.9.2 Viscosidad Cinemática
  - 3.9.3 Fluidos Newtonianos y no Newtonianos
  - 3.9.4 Viscosidad y temperatura
  - 3.9.5 Índice de viscosidad
- 3.10 Fabricación de un lubricante
  - 3.10.1 Aceites básicos
  - 3.10.2 Aditivos
  - 3.10.3 Lubricantes sintéticos y especialidades

- 3.10.4 Lubricantes sintéticos y su aplicación.
- 3.10.5 Lubricación óptima.

#### **4) Clasificación de lubricantes industriales y automotrices**

- 4.1 Tipos de lubricantes en el mercado
- 4.2 Organismos internacionales que regulan la calidad de los lubricantes.
- 4.3 Aspectos importantes a considerar en el desarrollo y comercialización de un aceite lubricante.
- 4.4 Lubricantes automotrices
- 4.5 Clasificación SAE para aceites de motor
- 4.6 Clasificación API para aceites de motor de gasolina y diesel.
- 4.7 Aceites monogrados y multigrados.
- 4.8 Clasificación SAE para aceites de transmisión automotriz
- 4.9 Clasificación API para aceites de transmisión automotriz
- 4.10 Propiedades de los lubricantes automotrices.
- 4.11 Lubricantes industriales
- 4.12 Clasificación ISO de viscosidad para aceites industriales.
- 4.13 Clasificación AGMA
- 4.14 Equivalencias en los sistemas de clasificación de viscosidad en lubricación
- 4.15 Criterios de selección de un aceite lubricante industrial.
- 4.16 Grasas lubricantes
- 4.17 Consistencia ó Clasificación NLGI en grasas.
- 4.18 Clasificación de grasas por aplicación
- 4.19 Criterios de selección de una grasa
- 4.20 Pruebas estándares de laboratorio para aceites y grasas lubricantes.
- 4.21 Acidez y basicidad en lubricantes.

#### **5) Administración de la lubricación**

- 5.1 Relación entre los costos de mantenimiento y una óptima lubricación.
- 5.2 Áreas involucradas en un programa profesional de lubricación
- 5.3 Información básica para organización de la lubricación en planta.
- 5.4 Recomendaciones básicas para la planeación de la lubricación.
- 5.5 Control de fugas
- 5.6 Frecuencias aproximadas de lubricación en equipos.
- 5.7 Almacenamiento de lubricantes

#### **6) Monitoreo de lubricantes bajo confiabilidad, herramienta estratégica.**

#### **7) Tribología, Lubricación y Ecología.**

#### **8) Perspectiva de la Tribología y la Lubricación en México hacia el presente siglo.**

#### **I) Conclusiones**

#### **II) Bibliografía**

## INTRODUCCION

La vida es movimiento y en el mundo de hoy en día, la industria, los automóviles, la aviación, la navegación, la tecnología espacial, en fin, cualquier rama de la tecnología y tipo maquinaria, esta ligada a fenómenos relativos al movimiento. Es factible, que el desarrollo tecnológico y el avance de la tecnología de la maquinaria industrial, no la podríamos concebir sin la presencia de los lubricantes y la lubricación, y se podría afirmar sin exageración que, sin el desarrollo de la Teoría de la Lubricación, el conocimiento de los Fenómenos de Fricción y de la Tribología (ciencia del estudio de los fenómenos de fricción entre las superficies), no existirían muchos de los grandes avances de la industria moderna.

En el presente trabajo se incluyen los fundamentos básicos de ciencia de la Tribología, la lubricación y los lubricantes, como lo son: principios teóricos, fricción, desgaste, tipos de lubricación, productos, propiedades, métodos de producción, principales pruebas de laboratorio, la importancia de la administración y planeación de la lubricación en una planta de proceso, ecología y lubricación y una breve perspectiva del desarrollo de la Lubricación y la Tribología en México.

Cabe resaltar que en México, al igual que en toda América Latina, hasta el año 2002, se inicia la formación la Sociedad de Tribólogos en Ingenieros de Lubricación capítulo México, cuya misión es difundir el conocimiento y el estudio científico y práctico de la Tribología y la Lubricación, donde, de manera formal, se inicia el estudio profesional y práctico de los fenómenos involucrados en estas ciencias. Esta sociedad, depende la STLE (Society of Tribologists and Lubrication Engineers) en los Estados Unidos, y por primera vez se reconoce la importancia y función de los fenómenos de lubricación en el desarrollo económico de México.

En un marco de globalización y de mayor competencia industrial, y ante un panorama económico crítico., es necesario desarrollar profesionales capaces dentro de cada ramo de la ciencia, que permitan la proyección de nuevas ciencias, ideas y conceptos, para generar estrategias y acciones, que ayuden a crear una sociedad mas justa y equilibrada. En el caso de la lubricación, no contamos en la actualidad con suficiente información, interés y educación en la práctica profesional e industrial, para la formación integral de profesionales en esta rama de la ciencia: La Tribología y La lubricación.

El presente trabajo tiene como objetivo contribuir, en modesta medida, a analizar los fundamentos teóricos básicos sobre el fenómeno de la lubricación, con el fin de auxiliar en la toma de decisiones a técnicos y profesionales, que se tengan a su cargo el mantenimiento y la lubricación de maquinaria de proceso, para que desarrollen criterios y estrategias en la solución de problemas de desgaste y lubricación en los sectores automotriz e industrial.

## 1) Importancia de la Tribología y la Lubricación y en el mundo actual

El historiador y economista norteamericano David S, Landes, cita en su libro “La pobreza y la riqueza de la Naciones” una afirmación en la que no caben muchas discusiones, *“El conocimiento, la ciencia, la tecnología a través de la historia, cuando se han puesto en practica, han sido claves en el desarrollo económico y social de los pueblos, entre más se ha sabido, más se ha podido hacer en contra de las enfermedades y se han desarrollado mejores condiciones y herramientas para luchar en nuestra sociedad. Sin embargo los hechos han demostrado que sólo aquellos países que practican una mayor libertad, que aplican los conocimientos y la ciencia en forma racional y que promueven el conocimiento científico, han generado la formación sociedades más justas y equilibradas”*.

A los países denominados del “primer mundo”, los caracteriza esta afirmación, utilizan los conocimientos, los pagan, los fomentan y han permitido desarrollar mayor riqueza económica en sus ciudadanos. No es nuestro caso comentar que existen diversas variables que detrás de esta afirmación, sin embargo, en los hechos, esta se ha confirmado.

En el mundo industrial de hoy en día el fenómeno de la lubricación viene a tomar un papel fundamental en el desarrollo de la mecánica, la ingeniería y el diseño de la moderna maquinaria industrial. Desde que surge y se planea la necesidad de instalar una industria para satisfacer una necesidad de cualquier tipo, se estiman, los recursos e infraestructura necesaria para llevar a buen éxito y sanidad financiera, así como los objetivos económicos y sociales de dicho proyecto.

Las metas de ventas, producción, generación de utilidades, se estiman y planean de manera optimista, suponiendo que existe un mercado a satisfacer, recursos humanos adecuados, recursos financieros particulares y gubernamentales suficientes para emprender el reto. Desde el punto de vista financiero, en la adquisición de los activos, diseñar e instalación de la maquinaria necesaria, se estima un periodo de vida útil de los equipos y los costos pertinentes para su mantenimiento, con el objetivo final, de esperar utilidades futuras, que permitirán la generación de riqueza y una forma de vida para los trabajadores, accionistas, gobierno, proveedores y quizá, con el tiempo, la reinversión de capital acumulado, para la instalación de una nueva planta ó empresa.

Sin embargo, durante el camino o periodo de vida industrial de un proyecto ó empresa, éste el ciclo señalado, puede verse mermado por múltiples razones: factores económicos, políticos, sociales, desastres naturales, etc., que pueden mermar las bondades estimadas de la empresa. De los factores señalados y desde el punto de vista científico – técnico, existe un fenómeno, del cual sólo observamos sus consecuencias en la práctica y que no ha podido, ni podrá ser controlado en su totalidad: ***La fricción y el desgaste de las máquinas.***

Líneas de producción paradas por mal funcionamiento, reparaciones y refacciones no contempladas, accidentes por mal mantenimiento, cuotas de producción no cumplidas, etc., indican, como causa principal, la presencia de fricción en la maquinaria.

Desde hace más de 5,000 años el hombre de manera consciente o no, ha recurrido a los lubricantes y la lubricación para controlar este hecho.

En estudios realizados por Universidades y Organismos Científicos Afiliados a la STLE (Society of Tribologist and Lubrication Engineers), se estima que en la actualidad, que de toda la energía perdida en fuentes generadoras en el mundo, una tercera parte se debe a fenómenos

de fricción ó alguna forma de ella. Lo anterior representa una considerable merma del poder potencial en la sociedad mecanizada de hoy en día.

La industria al final del siglo XX, ha entrado en una nueva concepción y crecimiento. En la actualidad se requiere de conocimientos tecnológicos, aplicados a incrementar la productividad, reducir los consumos de energía, incrementar la vida útil de maquinaria, equipo, transportes así como en cuidar, controlar y asegurar la calidad de los bienes producidos, en un entorno que no dañe nuestro medio ambiente.

La lubricación, considerado como “el arte de controlar la fricción y el desgaste”, ha adquirido en los últimos tiempos una importancia vital para la economía de un país, En los Estados Unidos se estimó que en el año 2000, las pérdidas económicas en la industria, por problemas atribuibles a fricción no controlada, superó los \$ 200,000,000,000.00 USD. (4)

La problemática económica anterior, ha dado pie al desarrollo de organismos científicos internacionales, para estudiar esta problemática y, analizar desde el punto de vista científico y práctico, el fenómeno de la fricción y su control, por medio del desarrollo de la ciencia denominada *Tribología*.

Nuestro país no puede sustraerse a ello y será necesario en un futuro no cercano, preparar profesionales y científicos en esta rama de la ciencia, que es de importancia vital para el eficiente desarrollo industrial del siglo XXI.

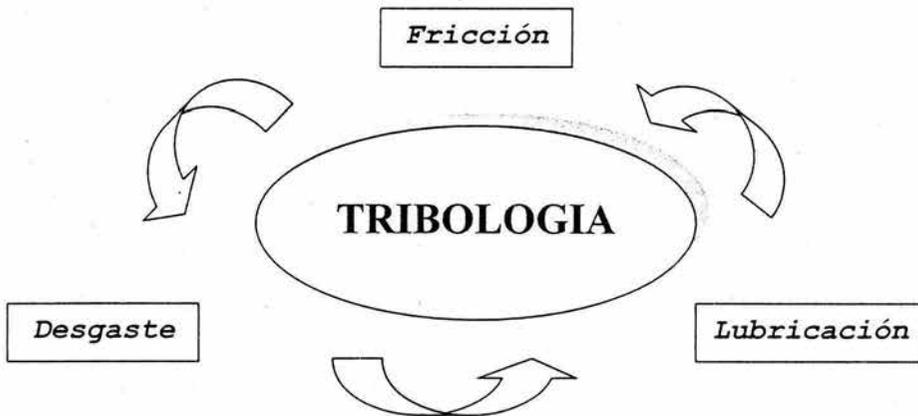
## 2) Introducción a la Tribología

### 2.1 Definición e Historia de la Tribología.

La palabra Tribología fue reportada por primera vez en un informe técnico por el científico inglés Peter Jost en 1966, en un reporte preparado por el Ministerio de Educación y Ciencia de la Gran Bretaña, evento donde la Tribología adquiere su nombre como una nueva disciplina científica: La palabra Tribología, tiene su raíz del vocablo griego *tribos*, que significa *rozamiento ó fricción* lo que literalmente se podría traducir como la “ciencia de la fricción”. En la actualidad los diccionarios definen a la Tribología como la ciencia y tecnología de los fenómenos desarrollados por la interacción de superficies en movimiento relativo, su campo abarca el estudio de la fricción, desgaste, lubricación.

Sin embargo, el campo de la Tribología es de hecho mucho más amplio que lo descrito por la definición anterior, es una ciencia multidisciplinaria, que involucra a la física, química, fisicoquímica, mecánica, termodinámica, ciencia de materiales e interactúa con el diseño de maquinaria industrial y su comportamiento.

Figura 2.11 - Campo de estudio de la Tribología



La Tribología es una “ciencia-arte” (29), donde se analizan problemas desde un punto de vista operacional y de gran significado económico como la confiabilidad, el mantenimiento, el desgaste mecánico y de materiales. Por otro lado esta ciencia ofrece respuestas a una extensa gama de problemas que abarcan desde aplicaciones en equipos aeroespaciales, hasta soluciones prácticas en aparatos utilizados en nuestra vida diaria en el hogar.

En 1944 se fundan en Inglaterra y en los Estados Unidos, las primeras sociedades científicas, dedicadas al estudio de los fenómenos de fricción y lubricación, la Ex Unión Soviética y países vecinos como Checoslovaquia y Polonia fueron los primeros en estudiar de manera formal el

fenómeno así como los primeros en generar científicos y en editar libros especializados, cuyos nombres tienen ya una gran reputación y significado para los científicos y tribólogos en la actualidad.

Los primeros estudios en Tribología, se enfocaron a predecir los mecanismos involucrados cuando dos superficies en movimiento-rozamiento, así como los tipos de desgaste presentados, desarrollándose a la par, el análisis y estudio del diseño de lubricantes adecuados.

El desarrollo de equipos de alta velocidad como turbinas de gas, sistemas de propulsión en aviación, turbinas nucleares y en particular los equipos y maquinaria para la industria aeroespacial y nuclear, aceleraron el conocimiento de sofisticados sistemas de lubricación, para control de la fricción y el desgaste, que hasta ese momento no se habían contemplado.

La problemática técnica de los equipos de ultra velocidad, como rodamientos, engranes, materiales de alta resistencia, no se habrían podido resolver sin el desarrollo de los principios tribológicos. Como resultado, el avance y conocimiento de los fenómenos de fricción, han generado nuevas teorías, principios, nuevos lubricantes, nuevos sistemas de lubricación, nuevos materiales, cuya aplicación en la práctica industrial está a nuestro alcance (20).

La tribología en la actualidad, ofrece soluciones potenciales a los más complejos problemas de lubricación y desgaste, en años recientes se han desarrollado avances en el análisis cualitativo y cuantitativo de lubricantes y trazas de desgaste superficial, con el fin de establecer medidas y decisiones correctivas y preventivas en maquinaria y procesos productivos.

También, se han desarrollado modelos matemáticos computacionales basados en análisis térmico, para predecir su comportamiento reológico bajo condiciones críticas de operación y se han establecido nuevas técnicas de lubricación líquida y sólida utilizando materiales autolubricados, para aplicaciones industriales donde los costos de operación y contaminación, no hacían viable la producción industrial de piezas metálicas en gran escala. Por otra parte, el desarrollo de lubricantes sintéticos y biodegradables de alta resistencia, están proponiendo soluciones desde el punto de vista ecológico, ante el grave problema de los desechos no controlados de los lubricantes usados derivados del petróleo, cuyas características químicas los hacen altamente contaminantes al medio ambiente (14).

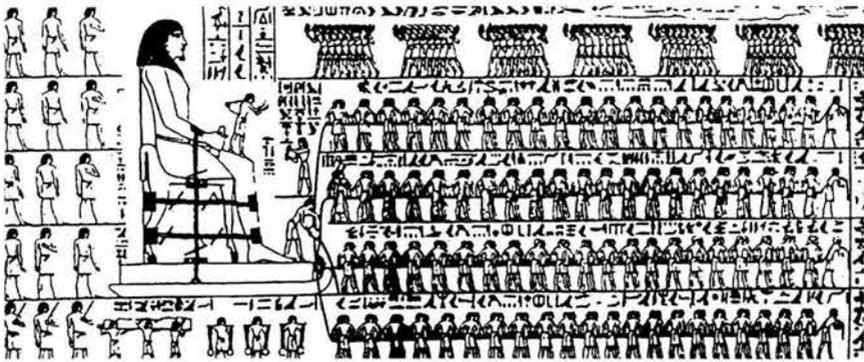
Pero el interés del estudio de la fricción se remonta miles de años en la antigüedad en el periodo paleolítico, donde se han encontrado vestigios de fabricación de diversas herramientas utilizadas para perforar piedras y producir hoyos, así como el descubrimiento de la producción de fuego por medio del frotamiento de diversos materiales entre sí. Se estima que aproximadamente 3,500 AC, se registra el uso de la rueda en diversas civilizaciones, lo que supone un descubrimiento y preocupación de nuestros ancestros en encontrar soluciones al problema de la resistencia y energía del movimiento de rodadura. La transportación de grandes estructuras y bloques de piedras para la construcción de pirámides, supone también un conocimiento de técnicas de lubricación y máquinas utilizadas para tal fin.

La figura 2.12, ilustra el uso de una especie de trineo para la transportación de una colosal estatua egipcia ( 1880 AC., Circa Egipto), en la figura se observan a 172 esclavos que son utilizados para empujar la enorme maza cuyo peso se estimó, sobrepasaba las 600 toneladas., se puede observar que un hombre está parado al frente del trineo en la parte inferior vertiendo un líquido para facilitar el movimiento, por la importancia de su trabajo y posición, no se dudaría que este personaje se considerase uno de los primeros ingenieros de lubricación de la antigüedad.

[ Dowson (1998), estimó que cada hombre empleaba una fuerza de 800 N, sobre esta base, la fuerza total de fricción se estimaría en  $172 \times 800$  N, y el coeficiente de fricción resultante sería del orden de 0.23].

Durante la época del esplendor de Roma, se detectaron varios vestigios de aplicación de principios tribológicos por parte de ingenieros militares romanos, en maquinas de guerra y de fortificación.

Fig 2.12 Egipcios utilizando un lubricante para mover una colosal estatua., El Bersheh, Circa., Egipto 1880 AC.



Pero fue hasta en el renacimiento cuando el artista e ingeniero Leonardo da Vinci ( 1452-1519), no sólo realiza sus extraordinarias obras de arte y de ingeniería, sino que deduce por primera vez, de manera científica, las primeras observaciones y leyes que gobiernan el movimiento de bloques rectangulares con acción deslizante. Leonardo introduce el concepto de coeficiente de fricción como la relación entre la fuerza normal de fricción y la carga-peso aplicado. Su trabajo en esta materia no generó resultados históricos relevantes, ya que los mismos permanecieron ignorados por muchos años.

En 1699 el físico francés Guillaume Amontons redescubre las leyes de la fricción de Leonardo, después de analizar el deslizamiento en seco de dos superficies planas. Estas observaciones fueron verificadas por otro físico francés Charles Augustin Coulomb en 1785 (mejor conocido por su trabajo en electrostática), el cual establece que la fuerza de fricción es independiente de la velocidad una vez que se inicia el movimiento y realiza experimentos donde hace una clara diferencia entre fricción estática y dinámica.

Muchos otros avances se realizaron hacia el año 1500, particularmente en el uso de rodamientos, en 1684 Robert Hooke sugiere la utilización de materiales de acero en los ejes de ruedas en combinación con materiales de bronce, en lugar de utilizar acero y madera, muy común en la época.

Sir Isaac Newton establece hacia 1668, las leyes que gobiernan el comportamiento del flujo de fluidos viscosos, sin embargo los primeros estudios científicos sobre lubricación aplicada se generaron hasta finales del siglo XIX con los trabajos de Beaucham Tower (1884) sobre la

lubricación hidrodinámica en conjunción con los modelos teóricos de Osborne Reynolds (1886) y N.P.Petroff, que dieron lugar al establecimiento de la teoría hidrodinámica en rodamientos planos, generando grandes avances en su diseño y fabricación.

El estudio del desgaste es el más joven de los fenómenos estudiados si lo comparamos contra la fricción y la lubricación., como muchas otro casos de la ciencia, su estudio se inicio de manera empírica. En realidad el estudio científico del desgaste se desarrolló hasta mediados del siglo XX, Ragnar Holm realizó en 1946 uno de los primeros trabajos científicos realmente significativos en el estudio del desgaste. (29)

Históricamente, la Revolución Industrial, es reconocida como el periodo de mayor desarrollo en la producción de maquinaria, el uso del poder del vapor y el desarrollo de la locomotora en 1830, generaron una gran fuerza intelectual y de habilidades humanas, que evolucionaron hasta el siglo XX, donde la extraordinaria demanda de conocimientos técnicos ha requerido de nuevos conocimientos, técnicas y tecnologías como las comprendidas por la ciencia de la Tribología.

El propósito del estudio y la investigación de la Tribología, consiste entonces en entender y comprender “el como” minimizar, controlar o evitar las pérdidas resultantes de la fricción y el desgaste en todo tipo de superficies donde se presente este fenómeno.

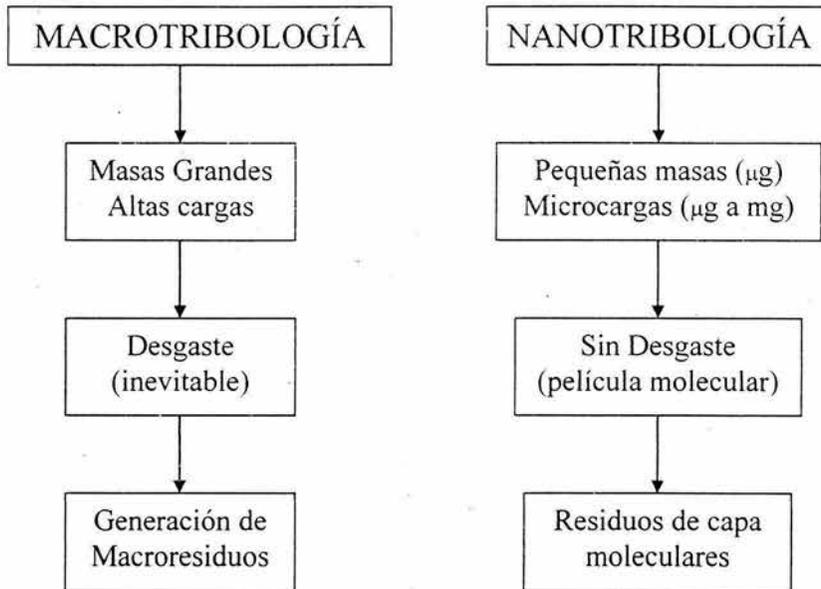
## 2.2 Macrotribología y Nanotribología .

En los últimos veinte años se ha encontrado que los fenómenos de fricción se llevan a cabo por causas a nivel molecular en las superficies en contacto y consecuentemente se han desarrollado trabajos de investigación en las propiedades mecánicas y tribológicas de los sólidos, así como en la estructura molecular de las superficies. Con los recientes desarrollos de equipos de medición a nivel molecular, de nuevos microscopios electrónicos de barrido, de técnicas computacionales y de modelos matemáticos para mediar fuerzas y fenómenos a escala molecular, ha surgido un nuevo campo la Microtribología, mejor definida en la actualidad como **Nanotribología**, es decir el estudio de la tribología a nivel molecular (Bhushan 1995). En este nuevo campo de la Tribología, se llevan a cabo experimentos e investigaciones teóricas moleculares de los fenómenos tribológicos tales como la fricción, el desgaste, la adhesión y la microlubricación a nivel molecular.

Las diferencias fundamentales entre la Macrotribología (Tribología) convencional y la Nanotribología se muestran en el esquema 2.21 Las propiedades de los materiales y las condiciones del sistema a nivel macro como la masa, las cargas y el desgaste son inevitables, y dominan el comportamiento tribológico. En la Nanotribología, las masas y las cargas son relativamente pequeñas y los fenómenos tribológicos están dominados por las propiedades superficiales de los elementos en contacto. La Nanotribología ha contribuido en la actualidad a comprender el comportamiento de micromateriales y microestructuras usadas en sistemas electrónicos de almacenamiento magnético, sistemas microelectromecánicos (MEMS), donde los componentes son extremadamente ligeros del orden de microgramos así como las cargas generadas y los sistemas son lubricados con filmes moleculares., la interpretación de los datos recabados, permiten establecer nuevos experimentos y predicciones de nuevos fenómenos basados en principios atómicos-moleculares.

Ambos campos de la Tribología son de una importancia relevante para entender el fenómeno interfacial de las micro y macroestructuras, generando un puente que liga la ciencia con ingeniería.

Esquema 2.21 Comparaciones entre la Macrotribología y la Micro(Nanotribología)



En la actualidad existen registrados más de 4,300 científicos dedicados al estudio de fenómenos tribológicos en más de 50 países.

En la práctica industrial, donde exista una máquina que tenga movimiento, el estudio práctico de la Tribología, permitirá obtener resultados de orden financiero cuando es aplicada a problemas prácticos como por ejemplo:

- Desarrollo y aplicación de fluidos de corte de alta velocidad
- Métodos de lubricación y lubricantes para el ahorro de energía en equipos de transmisión mecánica e hidráulica, reduciendo coeficientes de fricción.
- Selección óptima de rodamientos y lubricantes especiales para incrementar la VMAF (Vida media útil de trabajo antes de falla)
- Selección de lubricantes más estables a la oxidación, para la obtención de operaciones con bajos costos de mantenimiento. (lubricación de "por vida")
- Diseño y planeación de la administración y métodos computacionales para las actividades de lubricación.
- Diseño y mejora de métodos de análisis predictivo y proactivo con equipos y análisis fisicoquímico de laboratorio en lubricantes nuevos y usados.

Como podemos notar, todos los problemas señalados inciden en los costos directos e indirectos de producción de una planta de proceso o transformación., de ahí que el lubricante y el proceso de la lubricación, sean consideradas como herramientas fundamentales del desarrollo de la Tribología, y la importancia del conocimiento de los fundamentos teóricos y técnicos de su aplicación.

Dentro del gran espectro del estudio de la Tribología, nos referiremos en particular a los fenómenos que se presentan en la práctica industrial como los de fricción entre dos superficies rígidas, los cuales se presentan comúnmente en nuestra vida diaria y en la industria, en elementos mecánicos en movimiento relativo como: motores de combustión, rodamientos y chumaceras, cadenas, engranes de todo tipo, compresores, tornillos, levas, bujes, etc., los cuales querámoslo o no, estarán presentes en la maquinaria de cualquier proceso productivo o mecánico de nuestra vida moderna.

### **2.3 Fricción**

La definición clásica de la fricción la considera como la “resistencia al movimiento o deslizamiento entre dos superficies en contacto”, se encuentra presente en todos los elementos mecánicos en movimiento de una máquina. La fricción, se manifiesta como calor, y está ligada a la pérdida de energía mecánica, durante el inicio, desarrollo y fin del movimiento.

La fricción surge del hecho de que no existen superficies completamente lisas en la naturaleza (15), todas presentan rugosidades y cavidades en forma de pequeños “valles y montañas”, las que al tocarse ó rozarse por el movimiento y variaciones de carga entre ambas, chocan produciéndose contacto, adhesión y corte superficiales. La fricción debe ser controlada para evitar pérdidas innecesarias de energía y desgaste anormal de los materiales involucrados.

La fricción y el desgaste están íntimamente relacionados, ambos son producto del contacto superficial de dos elementos sólidos, pero puesto que la fricción es la causa del desgaste, existen diversos mecanismos para provocar: alta fricción y bajo desgaste ó baja fricción y bajo desgaste.

En la actualidad existen muchas teorías y estudios para entender el fenómeno de la fricción-desgaste, donde aún quedan muchas preguntas por resolver. No obstante que la fricción es un fenómeno inherente y necesario en nuestra vida diaria, por ejemplo en los frenos de los autos y el diseño de las llantas donde se requiere generar un tipo de fricción y desgaste controlados, en la maquinaria y equipos industriales rotativos y en movimiento significa: destrucción e ineficiencia mecánica y energética.

El estudio de la fricción y el desgaste, pueden ser considerados como un nuevo capítulo en el estudio de la resistencia de los cuerpos sólidos, o más bien de la ruptura de la capa superficial de éstos. Estudios en la última década (16), han demostrado que en los procesos tribológicos no sólo es importante considerar los sólidos que interactúan, sino también la de éstos con el medio ambiente, lo cual puede variar completamente las propiedades de las superficies.

Los dos principales procesos que se llevan a cabo en las superficies en contacto, para el desarrollo de la fricción, es la interacción de las rugosidades superficiales, que desarrollan puntos de contacto bajo altas presiones locales. Estos puntos de contacto reciben cargas puntuales grandes, independientemente de que la carga del par deslizante fuese baja, esto sucede ya que el área total de los puntos deslizantes es muy pequeña.

Lo anterior da lugar a considerar dos tipos de superficies en los fenómenos de fricción, una superficie “aparente”, (el área medible de contacto) y una superficie “real” de contacto, donde se concentran los puntos bajo alta presión puntual. Se estima que el área real de contacto es menor al 10% del “área total aparente” de las superficies en contacto (4).

Como las rugosidades presentan diferentes niveles, al elevarse la carga, las asperezas más salientes, van entrando en contacto sucesivamente, así el área de contacto real depende del número de puntos reales de contacto y no de sus dimensiones.

En las superficies de los sólidos, las moléculas no están en estado de equilibrio, y contienen un a gran cantidad de energía superficial (19). Esto conlleva a una activa interacción entre la superficie del sólido y los átomos o moléculas del medio circundante (sólido, líquido o gaseoso), formándose instantáneamente capas de productos adsorbidos y absorbidos. Ante el contacto superficial se genera un intercambio molecular de energía superficial, que en los sólidos da lugar a fenómenos de adhesión que desarrollan “microsoldaduras” superficiales, provocados por enlaces adhesivos, que abarcan todo tipo de interacciones moleculares entre los sólidos.

Estas fuerzas de enlace son suficientemente fuertes como para ocasionar transferencia de material de una superficie a otra, lo que provoca en las zonas de enlace, destrucción superficial.

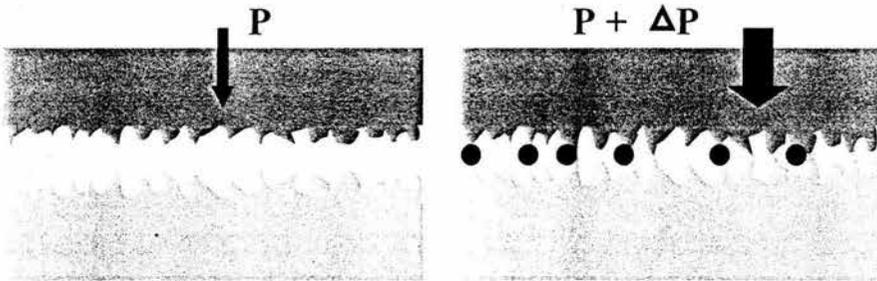


Figura 2.31 Contacto sucesivo entre asperezas de superficies al elevarse la carga, generando fricción.

Puntos reales de contacto ●

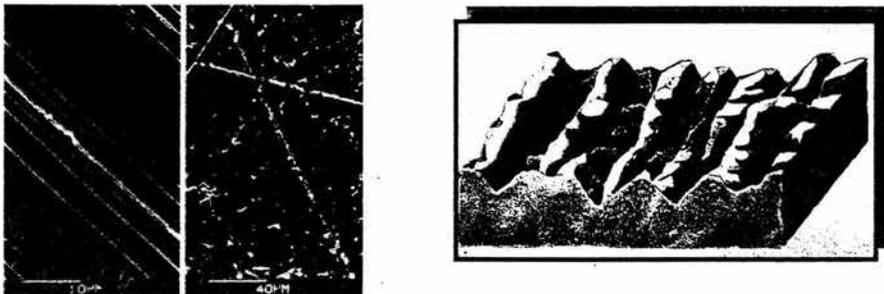


Figura 2.32 Las superficies aparentemente lisas no existen, a la izquierda superficies nuevas y rectificadas, al microscopio presentan valles y crestas (rugosidades superficiales).

La formación de los enlaces adhesivos se ven afectadas por la dureza superficial. Así, mientras más blanda sea la superficie, mayor será la deformación bajo carga y mayor la probabilidad de daño superficial. En este sentido en el estudio de los fenómenos de fricción, juegan un papel muy importante la estructura cristalina y las propiedades de los materiales en contacto, así como el tipo de capas que se formen en las superficies (19).

La fricción entonces es el objetivo central del estudio de la tribología. Los conocimientos aportados y desarrollados hasta el momento, han generado importantes conclusiones sobre los fenómenos de contacto, como la adhesión y el surcado de superficial, no obstante una teoría completamente elaborada aún no se ha presentado, y el problema central ha sido que la fricción depende de un sinnúmero de factores y complejos procesos fisicoquímicos en las superficies.

Uno de los puntos donde más se ha trabajado es en el estudio de los fenómenos que se presentan en el área real de contacto, ya que el resto de los procesos están muy condicionados a esta. El estudio de la topografía superficial y el cálculo del área real de contacto, no han podido ser explicados en términos de un modelo experimental efectivo.

Como se comentó, las superficies en contacto varían en su estructura y composición química, y esto influencia las reacciones triboquímicas entre las superficies, medio ambiente y la transmisión de material entre las superficies de contacto. La fricción y el desgaste dependen de la formación y destrucción de estas capas, un "tercer cuerpo" ó material desprendido producto del desgaste, influye en el coeficiente de fricción. Estudios recientes, se han enfocado al estudio de este tercer cuerpo y su efecto molecular en las superficies en contacto, por lo que en todo proceso de fricción, se hace indispensable su caracterización (17).

## 2.4 El Sistema Tribológico

En la figura 2.41, se muestran los elementos de estudio básico en un sistema tribológico, para realizar un estudio científico y racional, sobre un problema de fricción-desgaste-lubricación, se ha encontrado que existen factores que actúan de forma grupal, más que individual, en grupo, inciden sobre cada sistema en particular.

Cada problema en Tribología puede reducirse al análisis de cuatro elementos fundamentales presentes siempre en un sistema donde exista movimiento y fricción entre sus superficies:

- ☒ Superficie Base
- ☒ Superficie Opuesta
- ☒ Material Intermedió
- ☒ Medio Ambiente

En la práctica industrial se tiende a analizar los problemas de lubricación y desgaste, considerando sólo algunas variables del sistema y no al conjunto, generando una ecuación que no contiene todas las incógnitas o información necesaria., el resultado son respuestas no satisfactorias a los problemas de desgaste, lubricación y mantenimiento, generando una alta dependencia de la maquinaria sobre el técnico. Uno de los objetivos de la Tribología, es el de

desarrollar métodos y sistemas de control preventivos sobre la máquina y su desgaste para incrementar su vida útil y mejorar el retorno de la inversión de capital.

El análisis de un problema tribológico, se debe de atacar desde varios puntos de vista, una solución a un problema de fricción – desgaste – lubricación, se ha demostrado en la última década, que es esencial considerar no sólo la interacción entre los sólidos, sino también la de éstos con el medio ambiente, lo cual puede variar completamente las propiedades de las superficies.

Como puede observarse el problema de establecer una conexión entre fricción y el desgaste, en presencia o no de un “tercer cuerpo” ( que puede ser un lubricante), es un problema muy complejo, y en el mismo intervienen muchos factores como se considera en el sistema tribológico.

En un ejemplo clásico de sistema tribológico es el componente mecánico más importante en un equipo ó maquina: el rodamiento ( ver figura 2.42), donde se pueden identificar las principales elementos de un sistema tribológico.

Fig 2.42



Diversos tipos de fricción:

(a)Elemento rodante vs. anillo exte

(b)Elemento rodante vs. anillo inte

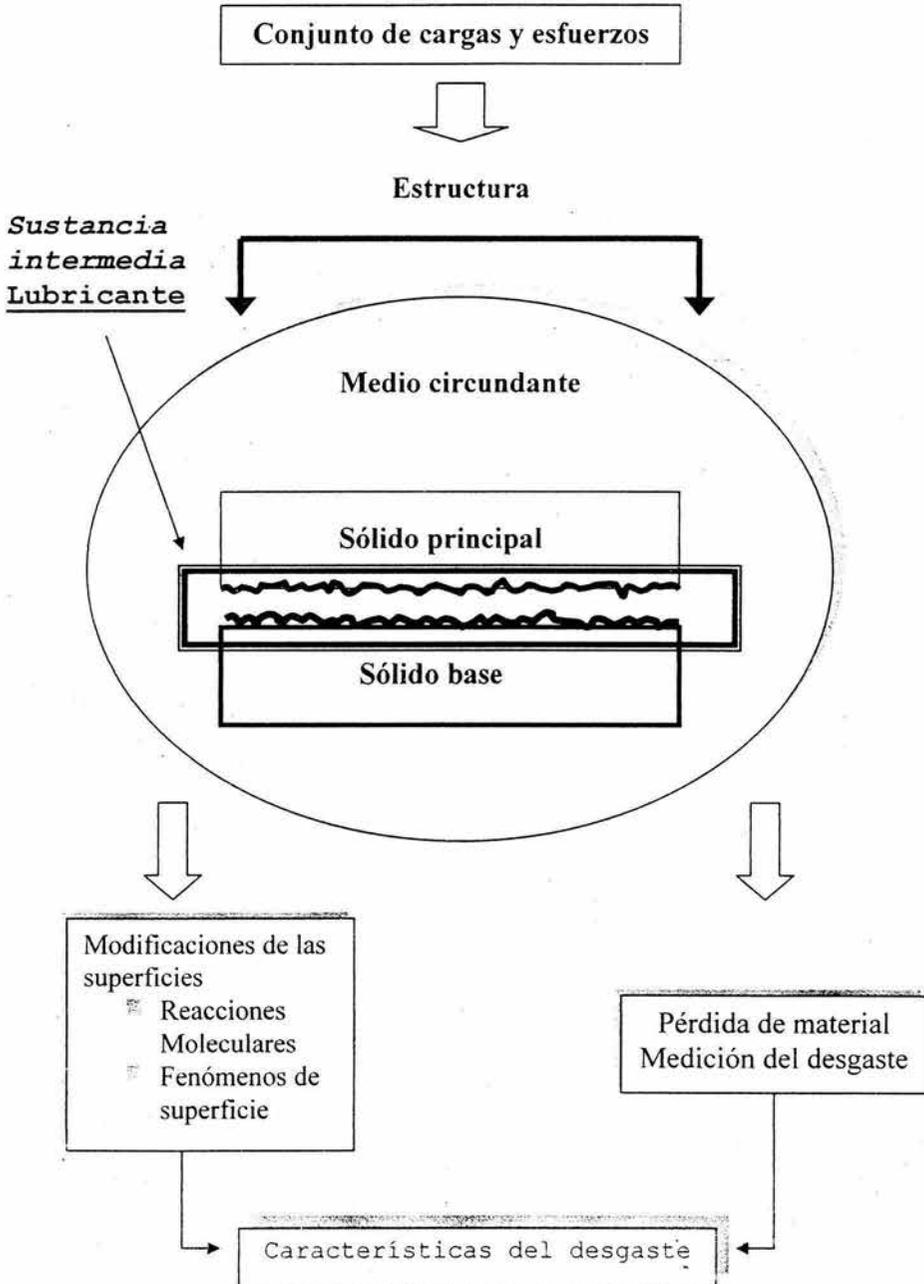
**Elementos del sistema tribológico:**

- (1) Cuerpo base: Anillo interior.
- (2) Cuerpo opuesto: Elemento rodante –bola
- (3) Material intermedio: Lubricante
- (4) Medio ambiente: Aire ó Vacío

En el rodamiento, están presentes en este particular ejemplo dos tipo de contactos friccionales, en cada anillo contra el elemento rodante como se describe en la figura en (a) y (b). Por otro lado, en el análisis del diseño tribológico, se deberán tomar en cuenta los factores descritos del 1 al 4., para obtener un perfil objetivo del comportamiento del elemento.

El lubricante, como material intermedio, deberá de ser capaz de separar las caras del cuerpo base (1) y el elemento rodante (2), soportar las cargas entre ambos cuerpos, para finalmente reducir el desgaste. El aire generalmente esta presente como medio ambiente, pero en la práctica existen la presencia de agua, compuestos químicos, partículas, vapor, etc., de un proceso, que afectan el comportamiento y rendimiento de los elementos descritos. En los último años, este factor se ha vuelto critico en el efecto sobre la vida útil del lubricante.(12).

Figura 2.41 El Sistema Tribológico



Para analizar el desgaste, sus mecanismos y efectos, se puede establecer un modelo de Sistema Tribológico Fig. 2.41, los cuales están sujetos a la interacción de todos los elementos descritos bajo la influencia de cargas externas e internas (colectivo de esfuerzos). Esta interacción puede asumir diferentes formas, la tabla 2.42, ejemplifica diversos sistemas tribológicos.

**Tabla 2.42 Ejemplos de diferentes Sistemas Tribológicos.**

<b>Sistema Tribológico</b>	<b>Sólido Principal</b>	<b>Sólido Opuesto</b>	<b>Sustancia intermedia</b>	<b>Medio ambiente</b>
Cojinete	Cubo	Eje	Lubricante	Aire
Engranaje	Piñón	Corona	Lubricante	Aire
Ajuste	Eje	Casquillo	-	Aire
Propela	Hélice	Agua	-	-
Freno de disco	Ferodo	Disco	-	Aire
Máquina Herramienta	Herramienta de corte	Pieza	Aceite de corte	Aire
Trituradora	Molino	Míneral	-	Aire
Oleoducto	Tubería	Aceite	Partículas minerales	-

## 2.5 Tipos de fricción

En el estudio de la fricción, se presentan diversas formas y tipos, dependiendo del tipo de movimiento, naturaleza de los materiales y condiciones del sistema general, de manera global (1) se puede hacer una clasificación de los siguientes tipos de fricción:

- **Fricción externa.** Entre cuerpos diferentes
  - De deslizamiento ( tangencial)
  - De rodadura
  - De rotación
  - Por su forma de contacto:
    - Estática
    - Móvil
    - De choque
- **Fricción interna.** Entre partículas de un mismo cuerpo

Los tipos de fricción descritos, a su vez comprenden diversos tipos de fricción específicos que varían en función de las propiedades de los sólidos y la capa intermedia con que interactúan, se presentan entonces los siguientes tipos de fricción específicos:

- **La fricción entre metal-metal.**- Es la que comúnmente se presenta en la maquinaria industrial en elementos lubricados, y es el resultado del rompimiento de la película lubricante protectora o por el agotamiento químico de la misma.
- **Fricción Sólida.**- Se presenta entre cuerpos con propiedades de un sólido, un tercer elemento se adhiere a los elementos en movimiento, como capa adherida al metal base.
- **Fricción Fluida.**- En este sistema están presentes al menos tres elementos y uno de ellos presenta propiedades de líquido. La fricción fluida, está condicionada al presencia constante de un lubricante líquido, que separa las superficies de los elementos sólidos, del sistema tribológico (ver figura).
- **Fricción Hidrodinámica.**- Es el estado de fricción donde se presentan a través del movimiento relativo de las superficies en contacto, cuando se encuentra sometido a ciertas condiciones de velocidad y de carga. En este estado de fricción juega un papel muy importante las propiedades del fluido y en particular de su viscosidad.
- **Fricción Hidrostática.**- Es el estado de fricción de mecanismos de operan a bajas velocidades con altas cargas, y la película hidrodinámica lubricante, debe de forzarse a entrar a presión antes y durante el movimiento.
- **Fricción Gaseosa.**- Es un estado de fricción donde que se encuentran constituido por al menos tres elementos y uno de ellos presenta propiedades gaseosas.
- **Fricción Mixta.**- Es un estado de fricción donde se presentan simultáneamente, al menos dos estados de fricción de los señalados anteriormente, la fricción mixta, es la que se encuentra más comúnmente en la practica industrial, e incluye generalmente la fricción sólida y fluida. Durante la fricción mixta, las propiedades de los materiales (elasticidad), juegan un papel de primer orden.

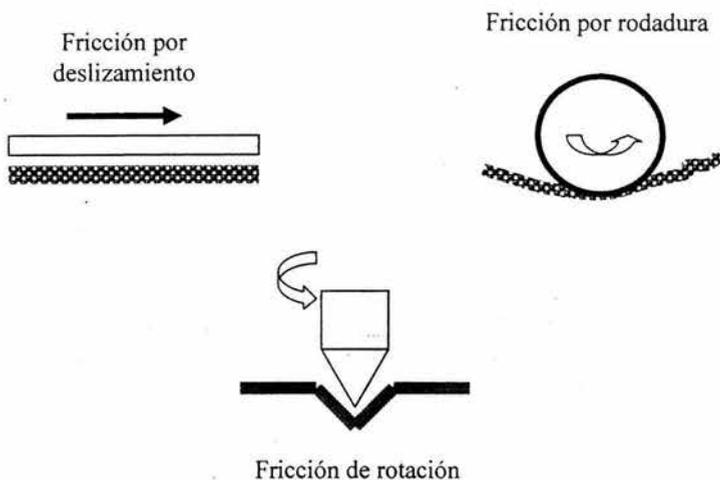
No obstante que la tribología abarca el estudio de la fricción entre superficies rígidas, plásticas y flexibles, nos enfocaremos a la revisión de conceptos clásicos aplicables a superficies rígidas metal-metal, que comprenden la gran mayoría de los equipos industriales de proceso y potencia mecánicos.

El área de aplicación práctica de superficies rígidas comprende el estudio de la fricción, desgaste y lubricación de:

- ☞ Equipos reciprocantes (motores, compresores).
- ☞ Diseño de herramientas para manufactura.
- ☞ Lubricación de moldes, fabricación de cables, extrusión de piezas
- ☞ Engranajes y rodamientos
- ☞ Fabricación y procesamiento de acero y sus derivados.

Las anteriores sólo son algunas de las aplicaciones de interés en el campo de la Tribología, pero se pueden encontrar, sin exagerar, cientos quizás miles de aplicaciones relacionadas con los fenómenos superficiales y su control.

**Figura 2.51.- Representación esquemática de los tipos básicos de fricción (en función del movimiento).**



## 2.6 Leyes de la fricción

En ingeniería, la fricción se evalúa por medio de tres cantidades adimensionales (17):

- El coeficiente de fricción, debido a la fricción por deslizamiento, que es la fuerza de fricción entre la carga normal.
- El coeficiente de fricción de impacto, que es la relación entre el cambio de la cantidad de movimiento de un cuerpo impactado en las direcciones normales y tangenciales durante el lapso del impacto.
- El coeficiente de fricción en términos de energía, donde se mide la relación del trabajo realizado para superar la fuerza de fricción y el trabajo total realizado.

La ciencia de la fricción por un periodo largo estuvo restringida a la medición de la fricción superficial con la ley:

$$F_w = W_{fr} / W$$

Donde al factor de proporcionalidad  $f_r$  se le denominó coeficiente de fricción y se consideró esa independiente de la carga. Como se señaló inicialmente, a Leonardo da Vinci (1452-1519), se le acredita el ser primero en desarrollar los conceptos clásicos de fricción en los que consideró que  $f = 0.25$ . Amontons (1699), inspirado en este trabajo, desarrolló experimentos y estableció las leyes clásicas de fricción:

- ☛ La fricción es proporcional al peso-carga
- ☛ El coeficiente de fricción es independiente del área aparente de contacto
- ☛ El coeficiente de fricción estático es mayor que el coeficiente de fricción dinámico.
- ☛ El coeficiente de fricción es independiente de la velocidad de deslizamiento

Las leyes anteriores sobrevivieron el paso de los años prácticamente sin cambio y hasta épocas recientes se han precisado y se ha demostrado sus limitaciones en la práctica, no obstante, se considera indispensable su conocimiento para introducirse en el estudio de los fenómenos de fricción seca y han servido como guías en análisis más profundos en particular en los fenómenos de fricción seca. Estudios más recientes revelaron que el coeficiente de fricción para un par de materiales es un cantidad que depende de varios factores como la rugosidad, dimensión de la superficie, su configuración y el estado de la película superficial.

La primera ley es correcta excepto en circunstancias de alta presión donde el área real de contacto se acerca al área aparente de contacto. La segunda Ley sólo es válida para materiales rígidos como los metales que contienen puntos definidos de contacto, pero no es aplicable a materiales con propiedades plásticas o viscoplásticas. La tercera Ley no es aplicable a materiales viscoplásticos, lo cuales no presentan coeficiente de fricción estática. La cuarta ley, de la misma manera no es aplicable a materiales como los elastómeros sino sólo en metales.

Borden y Tabor hacia 1950 fueron los primeros en medir el área real de contacto bajo condiciones de deslizamiento, desarrollando la teoría de las uniones soldadas entre las superficies de rozamiento. Existe la teoría mecánico-molecular de Kragelsky 1942, donde se introduce el efecto de los cambios de forma de los relieves superficiales de los cuerpos en contacto, debido a la acción de la penetración de sus asperezas, esto genera la formación de un "tercer cuerpo o fase" la cual se destruye y renueva con el desplazamiento de los cuerpos e influye significativamente en el crecimiento del área de contacto, en el coeficiente de fricción y en las propiedades de resistencia de la capa superficial. La resistencia al corte de esta tercera fase depende de sus enlaces moleculares y de la energía de activación necesaria para romper dichos enlaces (19).

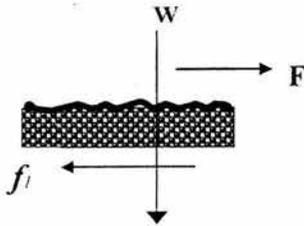
Debido a lo complejo del sistema, no existen teorías completamente satisfactorias hasta el momento, sin embargo, las concepciones de origen mecánico-moleculares son las que proporcionan explicaciones más universales al fenómeno.

## **2.7 Coeficiente de fricción**

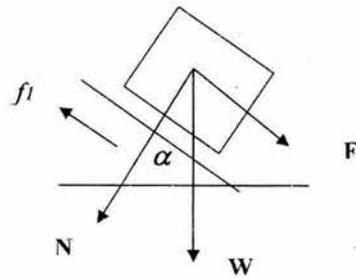
Considerando lo establecido hasta ahora, siempre que un cuerpo se deslice o rueda sobre la superficie de otro, existirá una fuerza que se opone al movimiento, llamada fuerza de fricción o rozamiento, que es paralela y opuesta al sentido del movimiento. Podemos hablar entonces de fricción estática al arrancar el movimiento y otra de tipo dinámica la iniciarse el movimiento. La relación entre la fuerza necesaria para iniciar el movimiento y el peso de lo que se va a mover, se conoce como coeficiente de fricción o rozamiento estático de acuerdo con la teoría clásica, y es la que usaremos de referencia para establecer el concepto fundamental de coeficiente de fricción.

La relación entre la fuerza para mantener en movimiento constante al cuerpo y su peso se denomina coeficiente de fricción cinético ( por deslizamiento o rodadura). Ambos coeficientes pueden ser por fricción sólida o fluida. En pruebas realizadas bajo condiciones estándares en materiales similares, se ha encontrado que el coeficiente de fricción sólidas por deslizamiento es del orden de 0.3, el de rodadura es del orden de 0.005. Este parámetro no es una propiedad intrínseca del material, sino que depende de varios factores como la temperatura, la humedad, la velocidad de deslizamiento, el tipo de lubricante, el acabado superficial y la forma de la región de contacto.

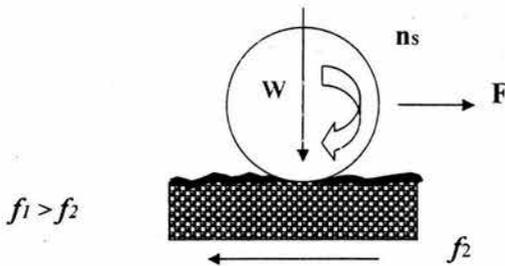
Figura 2.71 Un cuerpo cilíndrico ó esférico, presenta menor coeficiente de fricción sólida que una superficie plana, cuando se desplazan con respecto esta.



$$F = f_1 * W$$



$$F = f_1 W \cos \alpha$$



$$F = f_2 W$$

**Fuerza necesaria para iniciar el movimiento**

$$\text{Coeficiente de fricción} = \frac{\text{Fuerza necesaria para iniciar el movimiento}}{\text{Fuerza opuesta al movimiento (peso)}}$$

En el anexo final en la tabla A-01, se dan valores de coeficientes de fricción sólida, fluida y estática de algunos materiales.

Como se mencionó en 2.1, la fricción tiene una naturaleza dual mecánico – molecular y se puede considerar entonces que la fuerza de fricción tiene dos componentes:

Fuerza de fricción = Fuerza de adhesión (molecular) + Fuerza de corte (mecánica)

$$F_f = F_{ad} + F_m$$

$$\text{Coeficiente de fricción } f = \frac{F_f}{W}$$

En el caso de la fricción entre metales, en regiones donde puede existir deformación plástica el término  $W$ , se considera la presión promedio de resistencia del material más blando (2)

En el cálculo de la fricción, se consideran a los siguientes factores como los más influyentes en la generación de la misma:

- Carga
- Naturaleza de los materiales
- Acabado superficial
- Tipo de asperezas superficiales.
- Geometría del cuerpo
- Tolerancia entre las piezas
- Temperatura de funcionamiento
- Lubricación

La importancia en lubricación, reside en el hecho de que, bajo condiciones específicas de operación, el lubricante viene sustituir el efecto de la fricción sólida por el efecto de fricción fluida, cabe señalar que diversos lubricantes proporcionan también, diversos coeficientes de fricción fluida, los cuales pueden ser seleccionados, de acuerdo al diseño de la máquina, para proporcionar un control eficiente de la fricción y el desgaste.

## 2.8 Desgaste

El desgaste se puede definir como el deterioro sufrido por dos superficies como consecuencia directa de la fricción y rozamiento de sus rugosidades (3). El desgaste implica pérdida de material y deformación de las superficies en contacto, y puede llegar a ser crítico cuando sus efectos en una pieza y finalmente en una maquinaria, provoca que se pierdan tolerancias y resistencia mecánica, contra las condiciones de operación para las que fueron diseñadas.

La función específica de un lubricante es evitar y controlar hasta donde sea posible, el desgaste consecuencia del fenómeno de fricción seca ó sólida entre las superficies en contacto.

El desgaste es un elemento común de nuestra vida diaria y es resultado del uso de la cosas. Sin embargo, en la industria, las implicaciones económicas pueden ser severas, cuando el desgaste no se controla o se acelera. Millones de pesos en gastos de operación y mantenimiento industrial pueden evitarse, si la vida útil de los diversos componentes de una maquina se pudieran extender.

Se han realizado estudios tribológicos sobre los costos del desgaste en una planta de proceso pero se ha detectado que pocas compañías toman en cuenta o calculan las pérdidas debidas a este fenómeno, sin embargo de manera global el desgaste no controlado incide sobre costos directos e indirectos en la productividad de una planta, cabe señalar que en una gran mayoría de los casos, no se tiene conciencia del efecto del desgaste no controlado, sino sólo de sus consecuencias al incidir sobre los siguientes costos:

#### Costos de capital

- ✓ Reemplazo de equipos
- ✓ Renta de equipos
- ✓ Mantenimiento y reparaciones

#### Costos indirectos

- ✓ Trabajo incompleto
- ✓ Daños o pérdida de equipo colateral
- ✓ Tiempos muertos
- ✓ Mano de obra adicional
- ✓ Pérdidas de producción
- ✓ Productos de desecho
- ✓ Costos de limpieza
- ✓ Costo de contaminación

Además de los anteriores, existen otros costos ocultos provocados por el desgaste como pueden ser desperdicios y contaminación ó la adquisición de mano de obra extra o nuevas tecnologías de operación. En los países del primer mundo, el desarrollo y estudio de la tribología y de la ingeniería de lubricación, toma cada vez mayor importancia por las repercusiones económicas de un desgaste no controlado, con las consecuentes pérdidas de producción y productividad.

De los costos de producción en una planta industrial, en el mantenimiento de la maquinaria se han detectado las mayores oportunidades para minimizar los costos de operación y generar utilidades de operación a corto plazo, por medio de la implantación de programas de mantenimiento preventivo-proactivos, servicios de ingeniería de lubricación y la aplicación lubricantes y programa de alta calidad en el mantenimiento, con el objetivo de mejorar y optimizar el rendimiento en la maquinaria.

Los procesos de desgaste, involucran varios mecanismos fisicoquímicos que operan en conjunto, los mecanismos para conocer que es exactamente el desgaste, como opera y como se mide, no son aún del todo conocidos, sin embargo estudios científicos han detectado que en el fenómeno, se involucran los siguientes procesos (3):

- Química de superficies
- Mecanismos de fractura
- Deformación elástica y plástica
- Generación de calor
- Fenómenos de transferencia
- Fenómenos de adhesión

La observación científica y directa de estos procesos es muy difícil de evaluar, debido a que su origen se realiza a nivel microscópico y en la interfase de contacto, sin embargo, se han logrado avances significativos y extraordinarios en la medición de los productos del desgaste como lo son:

- Huellas de desgaste
- Residuos generados
- Alteraciones microestructurales
- Ruido
- Efectos térmicos
- Cambios de dureza
- Monitoreo programado de partículas
- Monitoreo y medida de las vibraciones en la maquinaria.
- Análisis Termográfico
- Análisis Químico y Ferrográfico

En el campo de la tribología y lubricación, se han estudiado y caracterizado los tipos de desgaste y comportamientos típicos de diversos lubricantes y sus consecuencias, determinando la influencia de las diversas variables en el control de la fricción en diversos materiales y equipos industriales.

## 2.9 Tipos de desgaste

El desgaste al igual que la fricción, no pueden ser eliminados completamente, pero si pueden ser controlados. Las superficies lubricadas se desgastan por diversos factores que pueden ser intrínsecos al tipo de lubricante utilizado, sin embargo existen elementos externos que se deben considerar en la evaluación del desgaste de una pieza mecánica como los son: las condiciones de operación y los contaminantes externos. En el menor de los casos, el desgaste se presenta como una mala selección del equipo, un mal diseño, o del empleo de materiales inadecuados. El desgaste es difícil de clasificar, aún identificando el tipo de mecanismo en cuestión, estudios experimentales de topografía superficial, sobre las superficies dañadas, así como microfotografías y análisis de los residuos generados, han reconocido y clasificado los siguientes tipos de desgaste (2,3):

- Desgaste abrasivo
- Desgaste adhesivo
- Erosión
- Microvibración
- Fatiga de contacto
- Corrosión

Cada uno de estos tipos de desgaste presenta un mecanismo diferente, y existen diversas causas y efectos en los diferentes componentes de la maquinaria. La importancia de la identificación de cada uno de los anteriores fenómenos, reside en el hecho de poder tomar control sobre los mismos, para tomar acciones correctivas y preventivas como las siguientes:

- ❑ Optimizar la forma de aplicación del lubricante
- ❑ Analizar la posibilidad de aplicar mejores lubricantes
- ❑ Analizar la sustitución de los materiales
- ❑ Analizar la reducción y control de las cargas
- ❑ Analizar posibles modificaciones condiciones de operación

- Implementar programas profesionales de mantenimiento preventivo
- Capacitar al personal involucrado en la práctica de la lubricación.

Cada problema de lubricación se debe de atacar, analizando de la mejor manera posible, el tipo de fricción y desgaste presente para obtener una solución adecuada en cada sistema a lubricar (ver tabla 2.91). Generalmente se cae en errores de apreciación, por no tomar en cuenta los parámetros descritos anteriormente. El desgaste entonces puede ser prevenido siguiendo los siguientes criterios:

- Identificando el tipo de desgaste
- Cambiando y mejorando las propiedades del lubricante utilizado.
- Cambiando y controlando la forma de aplicación del lubricante.
- Cambiando y controlando las condiciones de operación.
- Cambiando o rediseñando la pieza o maquina.
- Estableciendo un programa de monitoreo de lubricante en el sistema

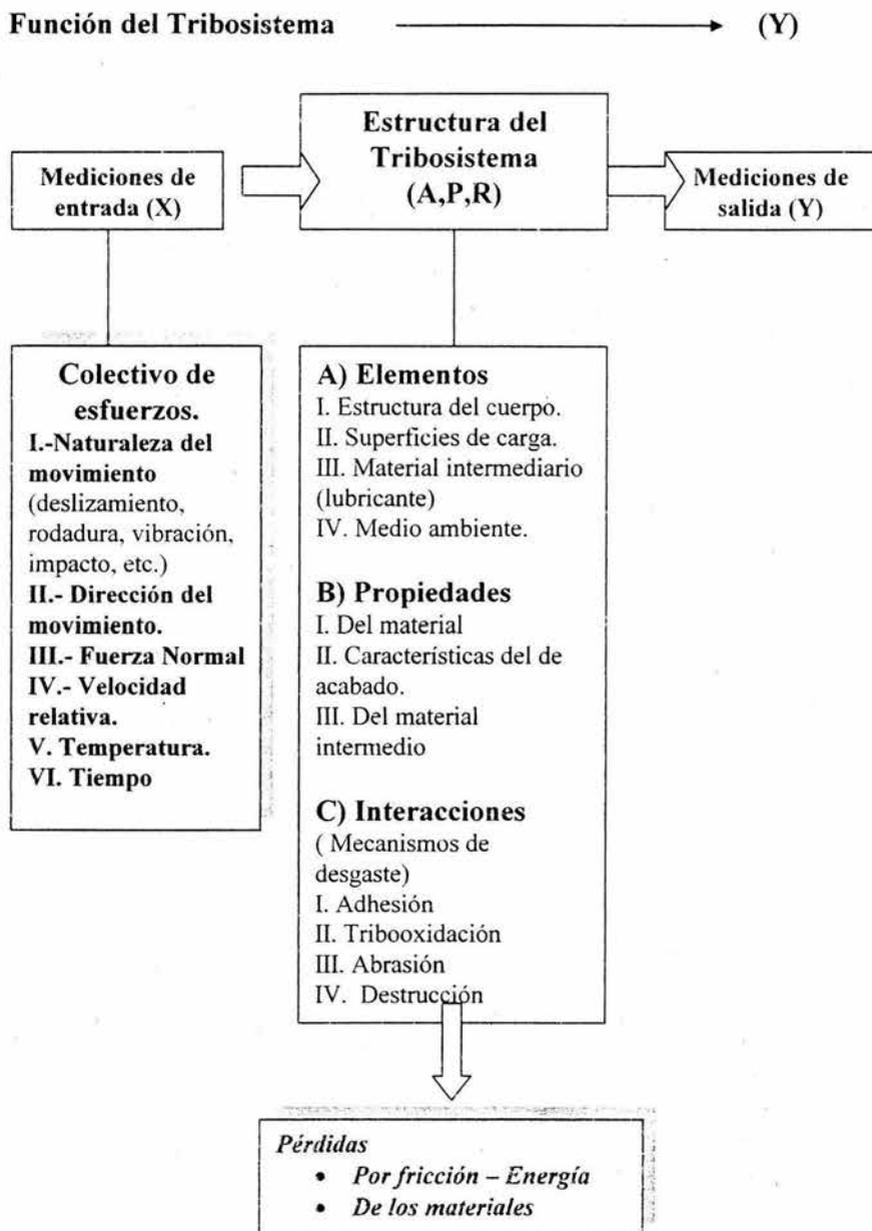
En la industria, se requiere que los operarios y personal técnico involucrado en labores de proceso de lubricación, entiendan y los conceptos básicos de una óptima lubricación y su repercusión en la productividad, ya que en la mayoría de los casos, los errores y altos costos de operación de mantenimiento, residen en la ignorancia de estos factores. Existe mayor literatura sobre el tema sobre las características y criterios de solución de problemas de desgaste, donde se clasifican aún más los diversos tipos de desgaste en Tribología, como los son los originados por fenómenos eléctricos (16).

La medición del desgaste y el método establecido para tal fin es de suma importancia en la caracterización y control del mismo, el comportamiento de un tribosistema y su análisis racional y científico es un área de oportunidad y de constante avance e investigación en el campo de la tribología.

Con relación a la cuantificación del desgaste deben de tomarse en cuenta diversas magnitudes para poder comparar o cuantificar el desgaste (ver esquema 2.91) generalmente existe una etapa de desgaste "normal" establecido para diversos mecanismos en condiciones ideales, por los fabricantes de los equipos. A través de diversos métodos de laboratorio, se establecen estándares de los diversos elementos del desgaste, y se comparan contra los encontrados en los ensayos en el campo para determinar su origen, gravedad y tendencia.

Existen diversas pruebas físicas y fisicoquímicas, por ejemplo: midiendo la pérdida de material que se produce en el desplazamiento de rodadura o deslizamiento, se obtiene un factor que relaciona la pérdida del material (mm) contra el desplazamiento producido (m), al ser ambas unidades de longitud, la relación resulta una unidad de desgaste adimensional (UD unidad de desgaste) que puede compararse contra estándares. Otras técnicas como la espectrofotometría de partículas por absorción atómica, en sus diferentes técnicas de emisión, fluorescencia o absorción, se utilizan en el análisis de aceites nuevos y usados, dichos métodos establecen estándares de desgaste de metales para diversos equipos y sistemas tribológicos. Los resultados, su adecuada interpretación y el análisis de su tendencia, permiten efectuar los mecanismos y causa raíz del desgaste para controlarlo y erradicarlo. Como todas las técnicas de laboratorio tienen sus límites de sensibilidad y precisión, y deben evaluarse en cada caso particular, sobre todo por los costos de los análisis de cada técnica.

## Esquema 2.91 Modelo para el análisis del desgaste en un Sistema Tribológico.



**Tabla 2.92 Tipos de desgaste y sus características**

Tipo de desgaste	Características	Acciones correctivas
Abrasivo	El desgaste ocasionado primordialmente por la presencia de partículas extrañas entre las superficies en contacto, estas puede ser de igual o mayor dureza que las de los componentes que las conforman.	<ul style="list-style-type: none"> <li><input type="checkbox"/> Analizar el tamaño de las partículas en el lubricante.</li> <li><input type="checkbox"/> Filtrar el lubricante en el sistema.</li> <li><input type="checkbox"/> Investigar el origen de la contaminación de partículas y su erradicación.</li> <li><input type="checkbox"/> Incrementar la limpieza integral del sistema.</li> </ul>
Adhesivo	Se presenta por contacto metal-metal de las microrugosidades superficiales en mecanismos lubricados o no. Este proceso implica, adhesión metálica, corte y arado superficial. Es común en las operaciones de arranque, paro de la maquinaria, altas cargas puntuales, ó como consecuencia de falla en la resistencia de la película lubricante o del agotamiento de los aditivos protectores.	<ul style="list-style-type: none"> <li><input type="checkbox"/> Mejorar las propiedades antidesgaste del lubricante y los aditivos. Implementar mejora con lubricantes con Sulfuro de Molibdeno.</li> <li><input type="checkbox"/> Analizar la viscosidad del lubricante utilizado y forma de aplicación del lubricante.</li> <li><input type="checkbox"/> Analizar la posibilidad de aplicación de un lubricante sintético.</li> <li><input type="checkbox"/> Analizar las cargas de operación del sistema contra las de diseño.</li> </ul>
Erosivo	Es causado por el choque de fluido con alta presión y conteniendo partículas en suspensión sobre la superficies. Este desgaste provoca roturas por fatiga. Se presenta cuando la viscosidad del aceite es mayor a la de diseño.	<ul style="list-style-type: none"> <li><input type="checkbox"/> Filtrar el lubricante del sistema.</li> <li><input type="checkbox"/> Analizar la viscosidad del lubricante.</li> </ul>

<p>Microvibración</p>	<p>Es causado por la microoxidación superficial, como consecuencia de microvibración y contacto superficial de las rugosidades, las cuales generan micro partículas, que son atacadas por oxígeno. El desgaste no controlado por este efecto, puede desembocar en microsoldaduras y fatiga acelerada del material.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>❑ Aplicando Pastas o lubricantes sólidos entre la superficies.</li> <li>❑ Incrementando las propiedades de resistencia a la temperatura y a la carga del lubricante.</li> <li>❑ Analizar las condiciones de carga y estabilidad mecánica del sistema – equipo</li> </ul>
<p>Fatiga de Contacto</p>	<p>Se presenta como resultado de la repetición esfuerzos de tensión, compresión y esfuerzo cortante sobre las superficies. Se generan microfracturas bajo las superficies, que después se propagan ocasionando rotura del material.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>❑ Mejorando las propiedades EP del lubricante con aditivos Sólidos o especiales.</li> <li>❑ Utilizando lubricantes sintéticos con mejores propiedades EP</li> <li>❑ Filtrando el lubricante.</li> <li>❑ Analizando las especificaciones y naturaleza de los materiales, condiciones de diseño de carga originales vs. las de operación del sistema</li> </ul>
<p>Desgaste Corrosivo</p>	<p>Es consecuencia del ataque químico superficial, de un aceite oxidado o de contaminación con agua y ácidos en el proceso ó medio ambiente. Las condiciones de acidez y pH del sistema cambian, haciéndolo susceptible para el ataque químico. Este desgaste genera pequeños cráteres que al unirse formas microgrietas, que producen el rompimiento de la pieza</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>❑ Implementar la calidad aditivos alcalinos del aceite.</li> <li>❑ Llevar un monitoreo adecuado de las condiciones de cambio de acidez.</li> <li>❑ Analizar las condiciones de temperatura y humedad en el sistema</li> </ul>

Por otro lado, la Ferrografía analítica, como una técnica de prueba universal, permite detectar, cuantificar, alertar, diagnosticar y pronosticar problemas de desgaste mecánico que pueden llegar a significar un alto costo del equipo y proceso productivo. La ferrografía capta partículas metálicas en el rango de 0.1 a 500  $\mu\text{m}$ , con lo cual cubre no solamente el campo del desgaste anormal y traumático, sino que opera también en el rango de los espectrógrafos, esto significa cubrir una amplia gama de posibilidades.

Una técnica desarrollada en los últimos diez años denominada Monitoreo de Maquinaria Basada en su Condición, se enfoca en el estudio de la confiabilidad de operación de un equipo y su rentabilidad, dicha técnica incluye un estudio profesional de todo el sistema tribológico del equipo y proceso, y permite establecer estándares de operación reduciendo los tiempos de respuesta ante problemas de desgaste en etapas tempranas de desarrollo, minimizando el impacto económico del mismo en un proceso.

Las técnicas anteriores, han tenido una amplia aceptación y un crecimiento en la industria en la última década, por la rentabilidad generada en las empresas donde se han aplicado dichas técnicas (21).

## **2.10 Medios para reducir la fricción y el desgaste.**

A continuación se enumeran algunos medios prácticos para la reducción de la fricción y el desgaste (1)

- Reducción de la fricción
  - Puliendo las superficies
  - Cambiando deslizamiento por rodamiento
  - Interponiendo un lubricante
  
- Reducción del desgaste
  - Mejorando u utilizando lubricantes más apropiados para las condiciones de operación y servicio
  - Mejorando las propiedades de los sólidos interactuantes.
  - Optimizando las frecuencias y periodos de lubricación
  - Implementando mejores programas de mantenimiento preventivo y proactivo
  - No sometiendo a los equipos a condiciones fuera de diseño original
  
- Capacitando al personal de nivel gerencial y operativo en los fundamentos y práctica de la lubricación industrial.
  
- Mejorando las condiciones de limpieza y evitando fuentes de contaminación del sistema lubricante-equipo.

### 3) Lubricantes y Lubricación

#### 3.1.- Breve historia comercial de los lubricantes

Los aceites lubricantes, dentro del estudio de la Tribología, son probablemente, uno de los productos más antiguos conocidos por el hombre, investigaciones históricas (1), tal como se señaló en un inicio, han demostrado que se tienen datos de la aplicación de productos lubricantes en el antiguo Egipto 2,000 A.C. y Mesopotamia 1,500 A.C., donde se encontraron ilustraciones y vestigios del uso de ciertos productos naturales como el aceite de oliva, limón y manteca, que fueron aplicados en el arrastre de piedras en la construcción de las grandes pirámides y en los ejes de madera de carros de guerra. En la antigua Roma, se utilizaban como lubricantes, productos tales como aceites de semilla de colza, de ricino y de palma, al igual que los aceites derivados de ballenas, marsopas y reses.

A ciencia cierta, se desconoce el tipo de fluido utilizado como lubricante, pero lo realmente extraordinario fue el conocimiento de la aplicación de estos materiales como medios para reducir la fricción en tiempos remotos.

Es sorprendente el hecho de que el uso de grasas, aceites animales y vegetales naturales utilizados como aceites o grasas lubricantes, se practicó durante muchos siglos de esta forma, y no es sino hasta mediados del siglo XIX, cuando surge una revolución tecnológica en el campo de la lubricación, con el desarrollo de la industria petrolera.

La referencia industrial más remota del empleo de un compuesto químico utilizado como lubricante basado en productos del petróleo, data de 1849, en una patente solicitada al gobierno americano, que proponía una mezcla de aceites de petróleo con ácidos grasos, dando origen a las grasas lubricantes (24). Para la lubricación de maquinaria industrial, se utilizaban aún, grasas de origen animal y vegetal, en particular para la lubricación de válvulas de máquinas de vapor. El Dr. John Ellis en los Estados Unidos hacia 1866, da a conocer un compuesto derivado del petróleo de alta viscosidad, que permitía la operación continua de máquinas a base de vapor, ayudando así a promover la utilización del primer aceite lubricante industrial en 1873. Durante la gran exposición industrial de 1876 en Philadelphia, George Corliss, inventor de la válvula de la máquina de vapor, presenta un producto que mejoraba las propiedades del producto descubierto por el Dr. Ellis y que se utilizaba para la lubricación de motores de vapor de dos pisos, cuya eficiencia y diseño no se hubieran logrado sin las propiedades lubricantes de dicho material.

Con el desarrollo industrial y en particular con el advenimiento de la industria automotriz, surgieron nuevos problemas técnicos que los lubricantes puros derivados del petróleo no podían resolver, en particular la degradación y oxidación de los compuestos base cuando existían grandes cambios de temperatura, presión y velocidad en la maquinaria.

La industria del petróleo inicia entonces la investigación de la aplicación de productos químicos para añadirlos a los aceites y grasas base, con el fin de mejorar sus propiedades originales, fue así como se inicia también el desarrollo de una industria paralela a la de los lubricantes: la industria de los aditivos.

A principios de nuestro siglo, por medio del crecimiento del mercado de la gasolina, se incrementa notablemente la demanda del petróleo crudo (8), hasta este lapso, el aceite crudo de los pozos de Pennsylvania, era el único usado como un lubricante básico rudimentario, sin embargo por medio del desarrollo del proceso de destilación al vacío patentado por Vacuum

Oil Co. de New York en 1901, se diversifican las fuentes de obtención de aceite refinado en mayor escala en otros pozos petroleros en los E.U..

Durante el período de 1910 a 1919 debido en parte a las consecuencias de la Primera Gran Guerra Mundial, la ingeniería mecánica, diseño de mejores equipos industriales, nuevas máquinas eléctricas y vehículos automotores más eficientes, demandaban ya el desarrollo de lubricantes de mejor calidad y rendimiento.

Es en este período donde se inicia una segunda etapa de crecimiento intenso en la investigación y desarrollo en la producción de los lubricantes, integrándose completamente nuevos aditivos químicos en sus formulaciones. Hacia 1920, 1930 y 1940 y se inicia otro periodo clave en el desarrollo de la lubricación: la Segunda Guerra Mundial. El ímpetu por la fabricación de nuevo armamento y maquinaria, da como consecuencia la creación de los primeros lubricantes sintéticos no derivados del petróleo para uso bélico en Alemania y los Estados Unidos.

Los lubricantes sintéticos están definidos como productos hechos a partir de fluidos base por medio de una síntesis química (8), los Polialquilenglicoles (Poliglicoles), fueron desarrollados para equipos de la industria militar hacia 1940, generalizándose su uso a la industria cinco años después ya que su formulación original se conservaba como un secreto militar. En Alemania y a raíz del bloqueo petrolero de los aliados, se instalaron centros de investigación secretos para la formulación de lubricantes sintéticos de alto rendimiento obteniéndose las primeras grasas lubricantes a partir de Sulfuro de Molibdeno y grafito que permitían obtener rendimientos y eficiencias muy superiores a las obtenidas en los compuestos comunes del petróleo, en particular sus propiedades de resistencia a altas y bajas temperaturas. Ciertos aceites a base de ésteres dibásicos, proporcionaban resultados sorprendentes para los motores de aviación y marítimos. Solo en Alemania estos productos se utilizaron como lubricantes de motor convencionales, ya que el bloqueo aliado les limitaba la utilización de materias primas derivadas del petróleo, esto dio pie a la creación de centros de investigación de nuevos lubricantes para la maquinaria bélica. También se experimentó con hidrocarburos, alquilbencenos y alfaolefinas, que han dado lugar a los actuales compuestos sintéticos base denominados: Polialfaolefinas (PAO).

En los años 50 investigadores de Inglaterra y los Estados Unidos, inician una guerra tecnológica en esta materia y producen los primeros aceites sintéticos formulados con diésteres para aviones y maquinaria industrial: La empresa Farben Industries, estudió más de 3500 ésteres como compuestos posibles en lubricantes de aviación, en 1951 se reportaron en los E.U., extensos trabajos con lubricantes fluorados, en la actualidad, éstos productos sintéticos, vienen a constituir el segundo gran segmento de este mercado particular, después de los aceite de base poliglicol. (5)

Polímeros a base de silicones también fueron desarrollados hacia mediados de los años cuarenta, particularmente en su aplicación como grasas, no obstante sus excelentes propiedades y rendimiento, no han tenido un desarrollo comercial amplio debido a su alto costo de fabricación.

La investigación en los últimos treinta años en el campo de los lubricantes y sus aditivos, ha dado lugar a un desarrollo espectacular de la Tribología en los países del primer mundo, en la búsqueda de bases sintéticas de alto rendimiento, desarrollando investigaciones en productos cada vez más eficientes y en la actualidad, con un enfoque ecológico (15).

Los grandes fabricantes de automóviles y maquinaria industrial, han procurado normar y desarrollar lubricantes minerales y sintéticos, regulando las pruebas de campo y calidad con las compañías petroleras y formuladoras de aditivos y lubricantes.

Organismos y sociedades industriales americanas, europeas y orientales, como la API ( American Petroleum Institute ), ASTM ( American Society for Testing and Materials ); SAE ( Society of Automotive Engineers ) , AGMA ( American Gear Manufacturers Association), ISO ( International Standards organization), ASLE ( American Society of Lubrication Engineers) etc., se unen para certificar, clasificar y normar la calidad y especificaciones tanto de las materias primas, como de los lubricantes industriales y automotrices, en el mercado mundial.

En el caso particular de México, las normas y especificaciones, se han basado en los lineamientos de éstos organismos. En la actualidad en nuestro país subsisten aún prácticas monopólicas en relación al manejo del mercado mexicano de lubricantes y su abastecimiento. Existe un mercado de productos de alta calidad donde participan las principales empresas petroleras del mundo, pero también se ha desarrollado un mercado de productos “chatarra” de baja calidad, que por ignorancia y complacencia de las autoridades, ha generado prácticas comerciales insanas, venta de productos no regulados y con bases de dudosa procedencia, todo lo anterior debido primordialmente, a un gran desconocimiento e ignorancia, de las funciones y principios de la lubricación y la Tribología. (27, 16)

### **3.2 Definición de Lubricante**

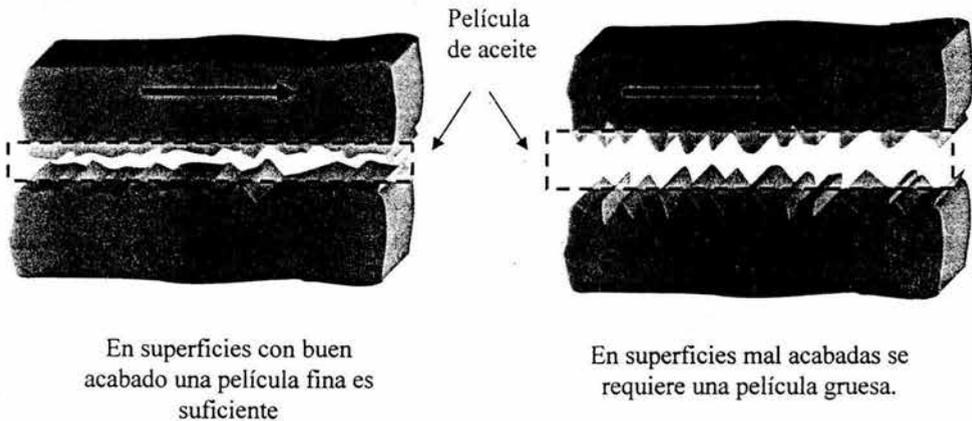
**“Se puede definir como lubricante, a cualquier sustancia interpuesta entre dos superficies en movimiento relativo, con el objetivo de reducir la fricción y/o el desgaste entre ambas “.**

Con base en la definición anterior, existen en la naturaleza diversos tipos de lubricantes que pueden presentarse en diversos estados físicos: líquidos, sólidos, gaseosos o mezclas de éstos, sin embargo, para nuestro caso particular, nos enfocaremos al análisis del funcionamiento de los lubricantes líquidos y sólidos ó combinaciones de ellos.

### **3.3 Características de la película lubricante**

La película lubricante, debe tener ciertas características físicas apropiadas para el sistema a lubricar, como se señalará posteriormente, la viscosidad es la principal propiedad a tomar en cuenta en el diseño y selección de un lubricante. En términos generales, una película delgada como una película demasiado gruesa para las condiciones de operación de un sistema es perjudicial, porque en el primer caso, esta se rompe dando lugar al contacto metal-metal y en el segundo, se puede presentar una generación excesiva de calor por el rozamiento interno de las capas de lubricante, lo cual provoca una dilatación superficial, con el consiguiente contacto metálico. El espesor óptimo de la película lubricante, depende de la rugosidad superficial. En superficies con acabado fino es suficiente una película delgada, mientras que en el caso contrario, se requiere una película gruesa. (ver fig 3.31)

**Fig 3.31 El espesor de la película lubricante depende del acabado superficial de los mecanismos**



La fricción metal-metal es la que causa el mayor desgaste, la fricción fluida lo reduce a tal punto que puede llegar a eliminarla. En toda máquina por sofisticada que parezca, solamente requerirán de lubricación los siguientes elementos (1, 9):

- Cojinetes Lisos y Rodamientos ( de bolas de rodillos, de agujas, etc.)
- Cadenas, Levas, Guías y Cremalleras
- Engranajes y Piñones: Helicoidales, Cónicos, Rectos, Sinfín-Corona, doble Helicoidales e Hipoidales, que pueden estar expuestos al medio ambiente ó encerrados dentro de una carcasa ( reductores y motoreductores).
- Cilindros: Con deslizamiento (émbolos), como en compresores, Motores de combustión interna, Cilindros de vapor, Sistemas Hidráulicos, y Herramientas Neumáticas.
- Cables, Tornillería y Uniones sujetas a vibración y corrosión.

### 3.4 Premisas en la práctica de la lubricación

Un lubricante es parte del diseño de una máquina, no es elemento ajeno a está, por lo tanto es importante tomar en cuenta los siguientes premisas en el análisis de un problema de lubricación (3) :

- De acuerdo con las condiciones de operación, cada máquina requiere una lubricación en particular

- En una máquina pueden existir elementos físicamente iguales, pero que pueden estar sometidos a diferentes condiciones de operación, requiriéndose entonces lubricantes específicos para cada caso
- Los lubricantes seleccionados, deberán contar con las características físico-químicas necesarias para su eficiente funcionamiento.

### 3.5 Funciones de un lubricante

Un buen lubricante debe de cumplir con las siguientes funciones:

- a) **Disminuir el rozamiento**
- b) **Disminuir el desgaste**
- c) **Evacuar el calor generado**
- d) **Transmitir potencia**
- e) **Sellar**
- f) **Evacuar impurezas de tipo orgánico o metálico**
- g) **Contaminar lo menos posible**

El lubricante juega un papel muy importante en la capacidad de disipación del calor del sistema, comparado con el agua, el lubricante es un mal transmisor del calor, su capacidad para absorber calor es de un 35 al 50% de la del agua, esto significa que para controlar la temperatura con la misma eficiencia que el agua, se requeriría un flujo de aceite de hasta tres veces mayor que esta. Lo anterior explica la necesidad de una recirculación adecuada de lubricante en condiciones de alta fricción o transmisión de temperatura externa al sistema.

La efectividad en el control de la temperatura, depende de la cantidad de lubricante recirculado, de las propiedades fisicoquímicas del mismo, de la temperatura ambiental y de la provisión de enfriamiento interno. Estos factores deben de tomarse en cuenta en el estudio de la lubricación y la selección del lubricante, y en particular cuando el enfriamiento depende en su totalidad de las propiedades del fluido seleccionado, por ejemplo en sistemas de circulación en la industria papelera, donde las temperaturas de operación son mayores de 90°C. (10, 2)

### 3.6 Factores que afectan el proceso de la lubricación

En el proceso de lubricación, existen elementos externos que afectan directamente al lubricante y al proceso, éstos son:

a) **Contaminación por materiales sólidos.** Si se lograra mantener a los sistemas de circulación cerrados herméticamente, la vida útil de un lubricante se podría extender notablemente, sin embargo, el polvo, partículas metálicas que se desprenden de los mecanismos, las impurezas que entran por los retenedores, degradan al aceite y surge la necesidad de cambiarlo. Empresas como Vickers ó Pall (25) , dos de los principales fabricantes de sistemas hidráulicos en el mundo, han establecido códigos y estándares de limpieza para sistemas hidráulicos y diversos mecanismos, donde se establecen niveles y rangos de partículas en tamaño y cantidad, a los cuales se les han asignado números y valores

diversos. Dichos estándares se especifican bajo el código ISO, con el objetivo de mantener un mínimo de impurezas en los sistemas, los estudios realizados por esta empresa, ha establecido parámetros para garantizar una vida útil del lubricante y del sistema, bajo normas de limpieza y filtración definidos. Estos parámetros generalmente están fundamentados en las limitaciones de los mecanismos más sensibles al desgaste abrasivo en un sistema (25, 21).

**b) Agua.-** Incide directamente en la vida y eficiencia de la película lubricante ya que forma emulsiones, así como acelera la corrosión y la formación de herrumbre.

**c) Condiciones de operación.** Existen condiciones y límites críticos o severos de operación, como alta temperatura (mayor a 80°C), altas cargas de impacto o vibración, velocidades muy altas o bajas, que inciden directamente en la vida útil de lubricante, ya que aceleran la oxidación del aceite y sus aditivos. Estas condiciones deben de analizarse adecuadamente para seleccionar el proceso de lubricación y el lubricante más eficiente, para las condiciones de servicio.

**d) Sistemas de aplicación del lubricante.-** Se puede contar con un lubricante óptimo, pero si éste no se aplica correctamente, en la cantidad precisa y en el sitio adecuado, los mecanismos pueden verse afectados por una baja eficiencia en su protección. Se recomienda estudiar las condiciones de aplicación del lubricante y evaluar en ciertos casos la posibilidad de automatizar su aplicación.

**e) Fluidos para corte.** En las operaciones de máquinas herramientas, los fluidos y refrigerantes utilizados pueden contaminar los depósitos de los aceites de lubricación, o viceversa. Las nuevas formulaciones, vida útil y rendimiento de los lubricantes sintéticos de corte y maquinado de metales, se verán afectadas por la incompatibilidad química de los lubricantes utilizados en la lubricación de la máquina de corte. El problema se resuelve entonces con el estudio de compatibilidad química de los productos involucrados. (15)

**f) Disolventes.** En el proceso de limpieza de mecanismos, pueden quedar trazas de disolventes limpiadores, que luego al aplicar los lubricantes los adelgazan, permitiendo el contacto metálico en las piezas.

**g) Sellos.-** Los sellos flexibles ó mecánicos, son dispositivos del sistema que aíslan y permiten la separación del lubricante y el equipo, y están diseñados para evitar la contaminación del lubricante hacia el depósito y la máquina. Cuando existe un problema de fugas o contaminación del sistema, se debe de realizar una evaluación del sistema de sellos del equipo. En muchas ocasiones el lubricante aplicado puede afectar las propiedades de los sellos utilizados disminuyendo su eficiencia., se recomienda entonces realizar pruebas de compatibilidad del lubricante con los materiales de los sellos en uso. (3)

**h) Errores humanos e ignorancia técnica.-** El elemento humano, es decir el personal que directa e indirectamente está involucrado en la práctica de la lubricación en las áreas de: producción, mantenimiento, y calidad, deberá contar con el personal técnico y profesional capacitado para la práctica y organización de la lubricación en una planta. Un fenómeno curioso en nuestro país, es el de encontrar en una planta de proceso que existe una gran ignorancia sobre la lubricación y su importancia, lo que lleva a cometer errores y pérdidas costosas de tiempo y pruebas de lubricantes en los equipos, por no contar con los criterios o métodos de resolución de problemas de lubricación en campo. El personal encargado del mantenimiento de equipos de proceso claves en una industria, cuando se entrena adecuadamente, garantiza una eficiencia y confiabilidad operacional, que se ve reflejada en una alta productividad de los equipos a su cargo. (21,22)

### 3.7 Teoría de la Lubricación y Viscosidad

La teoría moderna de la lubricación, que establece un modelo de cómo opera un lubricante, nace hacia finales del siglo IX, en el laboratorio del investigador Beuchamp Tower en Inglaterra. Tower (1880), era un ingeniero que había sido contratado para estudiar la fricción y el rozamiento en los rodamientos o cojinetes de los ferrocarriles. Tower descubrió el efecto de presión hidrodinámica de un lubricante durante el movimiento en los cojinetes de las ruedas, que daría como desarrollo el modelo denominado lubricación hidrodinámica (2, 16).

Otro investigador, Osborne Reynolds (1883), quien paralelamente estudiaba el comportamiento del flujo de fluidos, se intrigó por los resultados reportados por Tower y desarrolló un modelo matemático basándose en los principios de la mecánica de fluidos, para apoyar el modelo teórico de la lubricación hidrodinámica, cuyos principios aún operan hoy en día.

Reynolds aprovechando los estudios de Isaac Newton para la definición matemática de la viscosidad, representó al lubricante de manera ideal, al cual lo supuso fluyendo de manera laminar entre sí y adherido a ambas superficies. Con el movimiento de una de las superficies, el lubricante es empujado por la superficie móvil hasta formar un espacio que se va estrechando hasta crear una especie de cuña, de tal forma que al presionar esta, se genera una presión hidráulica que soporta la carga sobre la superficie y las separa.

La aplicación de este modelo a un cojinete como el de la rueda de Towers, ayudo a simplificar el fenómeno de la lubricación, en particular cuando Reynolds se percató de que las películas fluidas eran tan delgadas en comparación al radio del cojinete, que se podía desprestigiar su curvatura, esto permitió reemplazar al cojinete curvo por uno plano llamado cojinete plano deslizante, Reynolds se apoyo también de las siguientes hipótesis de comportamiento:

- El lubricante obedece la ley de Newton de fluido viscoso
- Se desprecian las fuerzas debidas a la inercia del lubricante
- Se supone que el lubricante es incompresible
- Se supone que la viscosidad es uniforme en toda la película
- La presión no varía en la dirección axial

Newton sin embargo, fue el primero que propuso que se requería una fuerza para desplazar las capas internas de un fluido en movimiento, estableció debía de existir un fuerza equivalente o similar a la de fricción interna de dos superficies, esta fuerza en el caso de un líquido, era la medida de la fricción interna a fluir o una resistencia al esfuerzo de corte interno.

El modelo básico propuesto por Newton que da lugar al concepto de lubricación hidrodinámica y a la importancia de la definición de la viscosidad de un fluido es el siguiente:

Para dos superficies separadas por un filme líquido de espesor  $h$ , y con las superficies en movimiento lineal  $U_a$  ( una superficie fija y la otra en movimiento), la fuerza por unidad de área necesaria (  $F/A$  ) o esfuerzo de corte (  $\tau$  ), Newton dedujo que esta era proporcional al gradiente de velocidad (  $du / dh$  ) o a la velocidad de corte (  $\dot{\gamma}$  ) del filme del fluido. (ver figura 3.71).

$$\tau = F / A = \eta (\gamma) = \eta du / dh \quad \dots\dots\dots(3.7.1)$$

La constante de proporcionalidad  $\eta$  en la ecuación anterior, se conoce como la viscosidad. Si la velocidad es función continua del espesor del filme y no existe interacción entre la superficie y el fluido, entonces:

$$(du / dh) = u_a / h = \gamma$$

La ecuación 3.7.1 se reduce a:

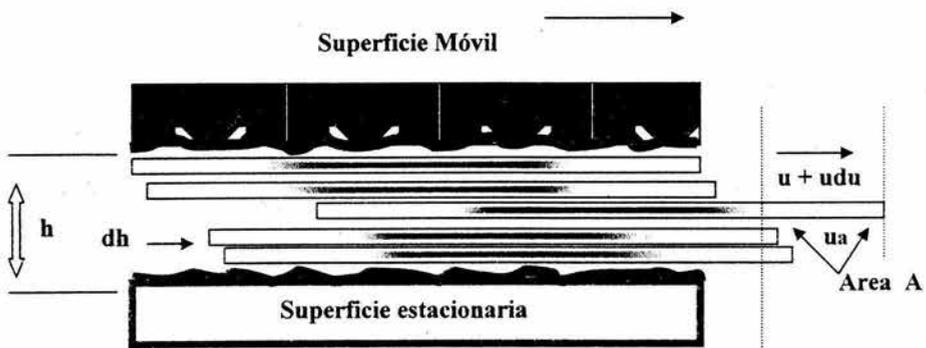
$$\tau = \eta [u_a / h]$$

Las unidades de la viscosidad  $\eta$  son lbs /in<sup>2</sup> (reyn) o dinas s/cm<sup>2</sup> (poise o P).

La conclusión importante, es el que la fricción interna del fluido, es decir su viscosidad, representa la relación entre el esfuerzo cortante y su velocidad de deslizamiento y es la propiedad más importante a considerar en el comportamiento de un lubricante, ya que está ligada directamente a evitar la fricción sólida de las superficies en contacto y por ende su desgaste (17,18).

Hertz en 1885, propone un modelo físico-matemático donde explica la distribución de cargas o presión (carga hertziana) sobre ciertos elementos mecánicos como los rodamientos planos, Dowson y otros investigadores, definen métodos prácticos para estimar el espesor de la película lubricante en las zonas de contacto de superficies con alta carga, que en particular, auxilian en el diseño e investigación de rodamientos industriales. Dowson permite demostrar en experimentos de campo que, los parámetros que más influencia tienen en el espesor y comportamiento del filme lubricante son: la viscosidad, velocidad del movimiento de las superficies ( en el caso de rodamientos, la velocidad radial ) y el coeficiente presión viscosidad del lubricante (6).

**Fig 3.71 Representación esquemática de planos paralelos de un fluido (lubricante) interpuesto entre dos superficies en movimiento relativo, con una velocidad  $u_a$ , separada por un filme de espesor  $h$ .**



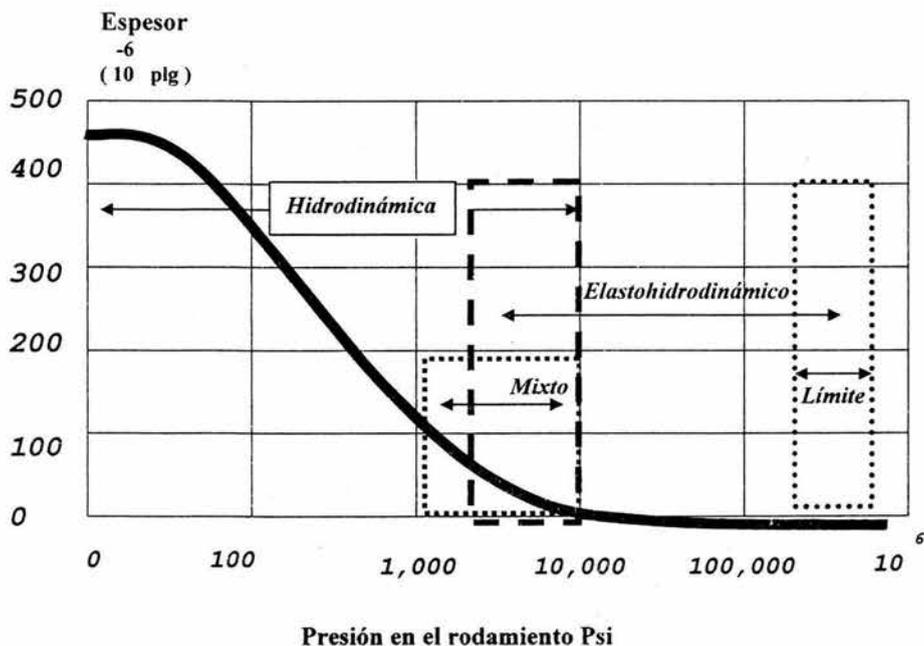
### 3.8 Regímenes de lubricación

El modelo ideal de referencia, supone diversos tipos de comportamiento del filme lubricante, dependiendo de las condiciones de operación del sistema. En Tribología este modelo puede diferenciarse en términos de la "separación" de las superficies en contacto de los elementos mecánicos, mismo que facilita en la práctica, el criterio y establecimiento en la solución de problemas, estos tipos se denominan regímenes de lubricación y los principales son: ( 1, 3)

- ◆ Hidrodinámico
- ◆ Elastohidrodinámico
- ◆ Límite
- ◆ Mixto

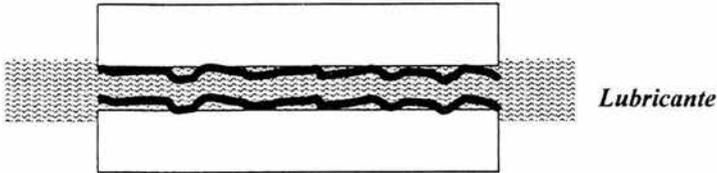
En el esquema 3.8.1, se ejemplifica lo anterior, ahí podemos ver como a medida que la presión entre ambas superficies aumenta, disminuye también es espesor del filme lubricante, las regiones señaladas indican los diferentes regímenes o tipos de lubricación presentes, estos fenómenos han sido estudiados para diferentes elementos mecánicos y permiten en la práctica, estimar el comportamiento y limitaciones del sistema a lubricar.

**Gráfica 3.8.1 Regímenes aproximados de lubricación, como función del espesor de película en un rodamiento de contacto**



### 3.8.1 Lubricación Hidrodinámica

En este tipo de lubricación, también denominada de película “gruesa”, existe cuando las superficies están completamente separadas por una película uniforme de lubricante, el espesor de la película, excede el de las rugosidades superficiales y las superficies no se tocan. En estas condiciones de operación el desgaste sería mínimo o prácticamente no se presentaría, si siempre existiese esta condición. Viene a ser el modelo de lubricación ideal buscado por diseñadores de máquinas y lubricantes, en el terreno práctico, esta condición es muy difícil de alcanzar, por los diversos factores y variables de operación presentes en un operación real.

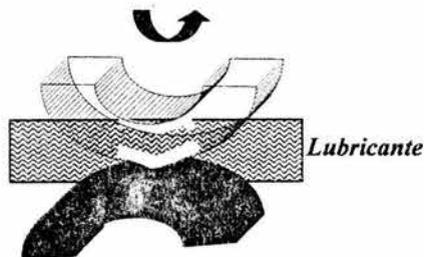


No obstante, este modelo, es muy importante en el diseño de la lubricación de máquinas de combustión interna, turbinas, compresores y transmisiones., donde se calculan los equipos para poder obtener dicho comportamiento. Los coeficientes fricción dependen del fluido lubricante en un cien por cien, obteniéndose valores en rangos de 0.0005 a 0.001. Los espesores de película se estiman desde 2 a 500 micras (1, 3).

### 3.8.2 Lubricación Elastohidrodinámica.

Esta condición en lubricación, se alcanza en superficies con contacto fuertemente cargadas (Presiones > 350,000 lbs), permitiendo que las superficies se deformen bajo esfuerzo mecánico para volver a su forma original cuando cesa la carga. En este sistema juega un papel de suma importancia el acabado del material y sus propiedades. Los rodamientos de bolas, los engranajes y las cadenas de transmisión y maquinaria de tracción, son un buen ejemplo de este comportamiento.

En este sistema el filme lubricante se sobrecarga y la viscosidad de éste aumenta enormemente en la región de alta carga (región hertziana) entrando en juego las propiedades fisicoquímicas e hidrodinámicas del lubricante en los puntos de deformación. La presión hidrodinámica evita y minimiza el contacto superficial, este fenómeno se repite disminuyendo e incrementando la carga superficial generando esfuerzos en el material y en el lubricante, al cesar la carga, la viscosidad del fluido vuelve a su estado original.(6)



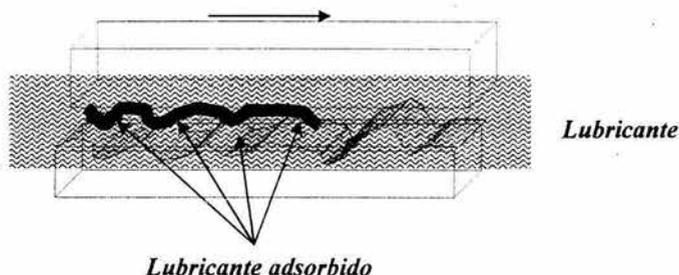
En este modelo, los valores de fricción se sitúan en rangos de 0.005 a 0.01, diez veces menores a los de la lubricación hidrodinámica, los espesores de película varían entre 0.1 y 1.5 micras de espesor. Los materiales en contacto, deben de presentar propiedades de dureza de 58 a 64 Rc, para garantizar operaciones eficientes. El desgaste en sistemas mecánicos sujetos a éstas condiciones se acelera, si no se previenen condiciones de lubricación adecuadas.(3)

### 3.8.3 Lubricación de capa límite

Este modelo se obtiene cuando el espesor de la capa de lubricante es insuficiente para separar las superficies completamente, el espesor es de una magnitud similar a las moléculas individuales de aceite, esta condición se presenta cuando la cantidad de lubricante es insuficiente ó el movimiento relativo entre las dos partes o superficies es demasiado lento existiendo altas cargas. Los coeficientes de fricción se incrementan y aumentando el calor generado en el sistema, así como las pérdidas por fricción.

En estos casos, las superficies pueden ser protegidas de la excesiva fricción, por medio de interacción química de las superficies, utilizando aditivos químicos, que previenen el desgaste adhesivo en los puntos de contacto.

En la práctica industrial, se puede pasar de la lubricación elastohidrodinámica a la lubricación límite en ciertos tipos de engranajes, rodamientos planos de alta carga y baja velocidad, cadenas de transmisión y equipos de transmisión de fuerza, haciéndose necesaria la aplicación de lubricantes especiales de extrema presión y extremada resistencia.

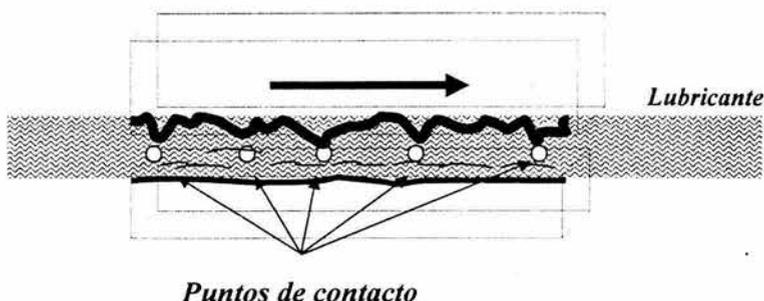


Los valores de fricción se sitúan en rangos de 0.02 a 0.10, los espesores de película varían entre 0.5 y 0.001 micrones de espesor. El lubricante se debe de reforzar con aditivos químicos especiales ó con lubricantes de tipo sólido como el Grafito y el Sulfuro de Molibdeno para imprimir propiedades extras de resistencia de carga , el rol del lubricante y sus aditivos son determinantes en la eficiencia de la lubricación. (15).

### 3.8.4 Lubricación Mixta

Aparte de los sistemas mencionados, existe otra condición llamada mixta, que combina las anteriores, se presenta en condiciones de operación de lenta velocidad, muy altas cargas, espesor o viscosidad del lubricante muy baja para las condiciones de diseño, y en puntos de arranque o paro de los equipos. En este estado la carga es soportada por las asperezas

superficiales, las cuales penetran entre ambas superficies, desarrollando desgaste de tipo adhesivo y erosivo.



Este fenómeno es prácticamente imposible de evitar y debe de tomarse en cuenta en el diseño y construcción de los materiales y equipos donde se presentan condiciones como las señaladas, así como en lubricantes requeridos para tal operación.

Los coeficientes de fricción y espesores de película son similares a los de capa límite y elastohidrodinámica (1,3).

### 3.8.5 Lubricación Hidrostática

Este modo de lubricación consiste en crear el filme lubricante por medio de la introducción de lubricante por alta presión. Este tipo de lubricación se aplica en equipos y elementos mecánicos donde se precisa un espesor de filme controlado así como la posición del eje concéntrico es crítica. La formación de la película con alta presión, implica diseños especiales y equipos muy precisos que hacen la operación costosa, pero el desgaste es prácticamente nulo, ya que se fuerza la formación de una película hidrodinámica. Es particularmente utilizado en cilindros y rodamientos planos hidrostáticos (1, 10)

### 3.8.6 Curva de Stribeck

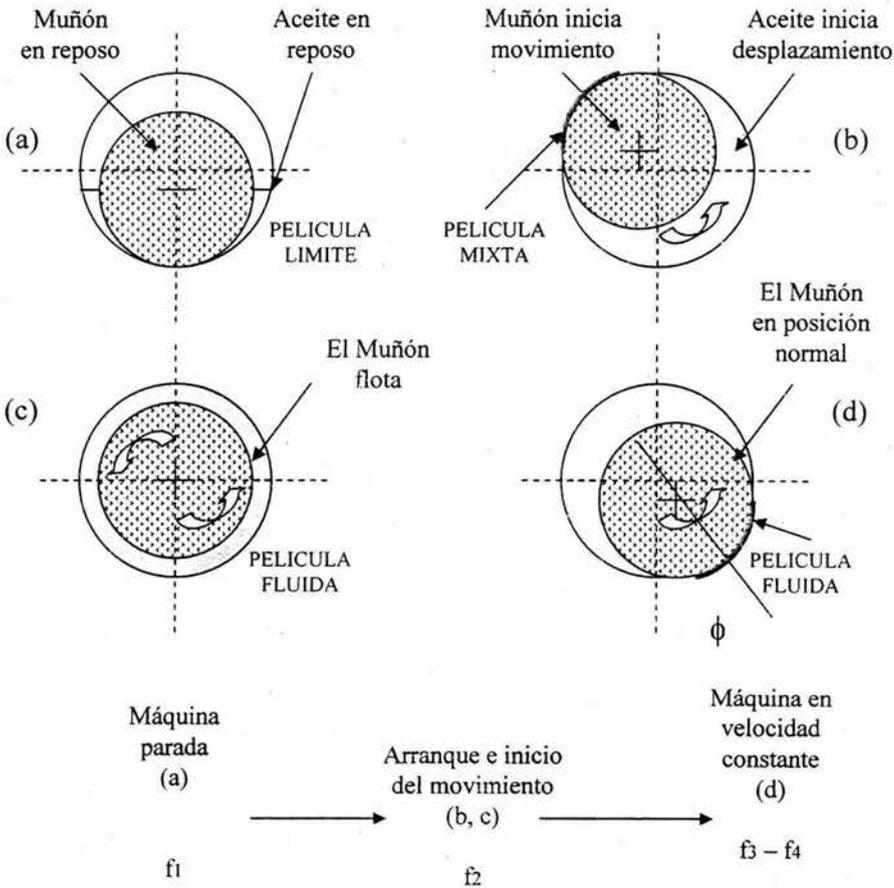
Para analizar de manera gráfica el comportamiento hidrodinámico en lubricación, tomaremos en cuenta la figura 3.8.6, donde se muestra la formación de la película lubricante en un cojinete plano en función del movimiento. En la gráfica generada por Hersey y Stribeck (26,1), se analiza el coeficiente de fricción en función del parámetro que combina la viscosidad absoluta del fluido (en centipoise), la velocidad del eje  $n_s$  (rpm) y la presión unitaria de carga ( $\text{kgf/cm}^2$ ), este factor se conoce como parámetro de Hersey.

La curva de Stribeck, nos indica la variación de los coeficientes de fricción en diferentes condiciones de velocidad en un cojinete plano, pero sus parámetros y comportamiento, se pueden extender a otros equipos.

Al iniciarse el arranque de una maquinaria, esta se encuentra en estado estático antes de iniciarse el movimiento (a), el coeficiente de fricción  $f_1$  nos indica que la fricción es de tipo estática, el cual aumenta ligeramente a  $f_2$  al iniciarse el movimiento, en este punto las rugosidades del material se entrelazan, presentándose el fenómeno de lubricación límite y mixta (b), a medida que la velocidad se incrementa, la acción de penetración de lubricante

también se incrementa, existiendo cada vez más aceite en las superficies, haciendo que el coeficiente de fricción sólida disminuya, hasta ser sustituido por el de fricción fluida del lubricante (c) en  $f_3$ , en este punto el sistema entra en su fase de equilibrio y se delimitan las condiciones de lubricación la límite e hidrodinámicas (d). En consecuencia siempre se procuraran en diseño, tener condiciones de operación que permitan obtener coeficientes de fricción por arriba de la zona de  $f_3$  y hasta  $f_4$ . (Ver Grafica 3.8.6)

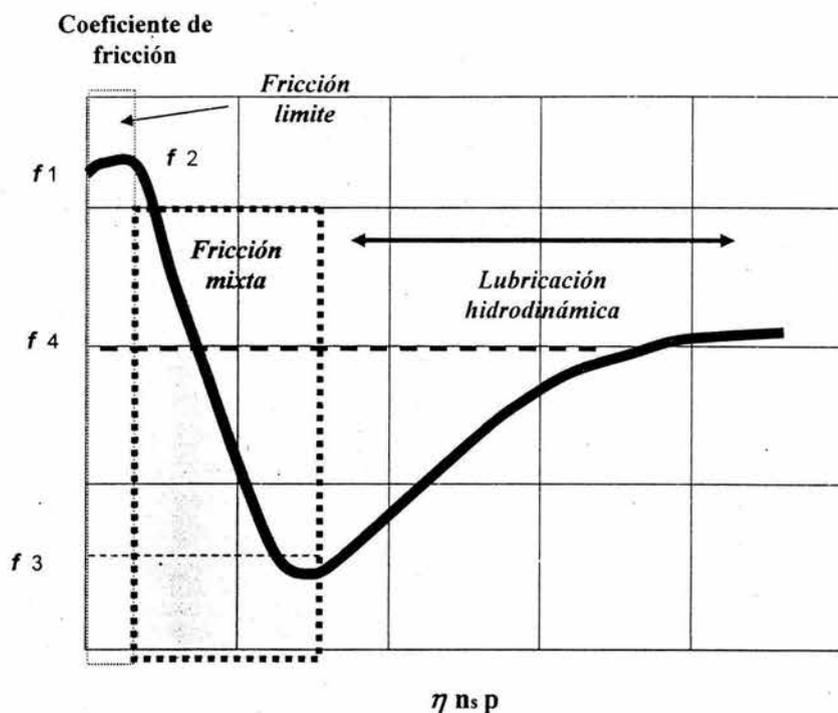
**Figura 3.8.6 Formación de película lubricante en un cojinete plano en función del movimiento**



Un parámetro de medición adecuada, es la obtención de parámetros de Hersey,  $\eta_{nsp}$ , de cinco veces máximo superiores a los valores para  $f_3$ , para valores superiores, entra en juego los efectos sobre la viscosidad interna del lubricante, la cual puede incrementar la temperatura de

operación, dando lugar en la práctica, a fugas de aceite, dilatación de sellos, pérdidas de potencia y baja eficiencia general del sistema (1, 2, 3).

**Gráfica 3.8.6.- Curva de Stribeck**  
**Regímenes de lubricación en función del parámetro adimensional**  
 $\eta n s p$



### 3.9 Viscosidad

La Viscosidad, es la propiedad más importante en un lubricante, se define como la medida de la fricción interna, actúa como resistencia contra la modificación de la posición de sus moléculas, al actuar sobre de ellas una fuerza ó tensión de corte. La viscosidad de un fluido lubricante y tan complejas como la de un aceite mineral, puede verse afectada, por una parte, por las variaciones internas de su composición y estructura, determinadas por el origen del petróleo crudo y, por otra parte, por condiciones externas como la temperatura y la presión. La temperatura es el factor que más afecta la viscosidad de un lubricante, de forma tal que, cuando la temperatura aumenta, esta disminuye y viceversa. Existen dos diferentes métodos de caracterizar la viscosidad o resistencia a fluir de un material, pero para el caso de los lubricantes podemos establecer dos: el sistemático y el empírico.

El sistemático define la viscosidad en términos del flujo observado bajo una fuerza o carga definida, mientras que el empírico utiliza el flujo observado en un equipo de laboratorio.

El método empírico es el más extensamente utilizado en la práctica para caracterizar un sistema, sin embargo el cálculo de la viscosidad sistemática es el utilizado en los sistemas de ingeniería como por ejemplo en el cálculo de la caída de presión asociado con el flujo en una tubería. (17, 18). Tomando en cuenta lo descrito en 3.7 tenemos:

$$\eta = \frac{F/A}{U_a / h} = \frac{\text{Esfuerzo cortante}}{\text{Velocidad de deslizamiento}}$$

$$\text{Viscosidad} = (\text{dinas/cm}^2)/\text{seg} = 1 \text{ Poise}$$

La viscosidad sistemática puede ser expresada en dos términos: Viscosidad absoluta ó dinámica y Viscosidad cinemática.

Viscosidad sistemática	{	Viscosidad absoluta ó dinámica	<u>Unidad de medida</u> ( poise ) - ( pascal - seg )
		Viscosidad cinemática	( stoke )

### 3.9.1 Viscosidad Absoluta o Dinámica

La Viscosidad absoluta o dinámica es función sólo de la fricción interna del fluido y se define como la relación entre la fuerza de corte o cizallamiento causada por el flujo resultante de un gradiente de velocidad. La unidad de medida en el sistema cgs es el poise (P) ó centipoise (cP) - g / ( cm \* seg). En el sistema internacional SI ( basado en el sistema mks ), la unidad base es el pascal – segundo ( Pas), la relación entre ambas medidas se da como sigue:

$$1 \text{ Pas} = 10 \text{ P}$$

$$\text{un milipascal / segundo ( mP*s )} = \text{un centipoise ( cP )}$$

### 3.9.2 Viscosidad Cinemática.

En muchos problemas de ingeniería, donde la fuerza gravitacional debe de tomarse en consideración, la viscosidad generalmente se caracteriza por el cociente de la viscosidad absoluta entre la densidad del fluido y es la más comúnmente utilizada para caracterizar a los lubricantes:

Unidad de medida

$$\text{Viscosidad cinemática} = \text{Viscosidad absoluta} / \text{densidad} \quad (\text{centistoke})$$

Dado lo anterior, dos muestras de fluidos con diferente viscosidad absoluta, pero con igual viscosidad cinemática, pueden fluir gravitacionalmente al mismo tiempo a través de un mismo aparato. En el sistema cgs, la unidad de medida es el stoke (St) o centistoke (cSt) = (centímetro cuadrado por segundo), en el sistema SI la relación de unidades vendría dada en milímetros cuadrados por segundo, como sigue:

$$\text{Un milímetro cuadrado por segundo (mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}\text{)} = \text{un centistoke (cSt)}$$

Existen otros sistemas de viscosidad, como el Saybolt, Redwood y Engler, que se siguen utilizando ampliamente, debido a la familiaridad de su manejo en la industria. En la práctica industrial, las medidas de viscosidad se regulan por Organismos Mundiales de Estándares y las medidas de la viscosidad, aparecen con siglas y especificaciones diferentes, siguiendo numeraciones y letras de fácil acceso a los operarios, para ayudar en la selección apropiada de un lubricante, en la secciones 4.8 y 4.9, se indican estas medidas y sus equivalentes en la práctica contra las mediciones absolutas y cinemáticas en el sistema SI.

La mayoría de las mediciones industriales de la viscosidad se realizan en centistokes y se convierten en otros valores como las especificados por la SAE, ISO y AGMA.

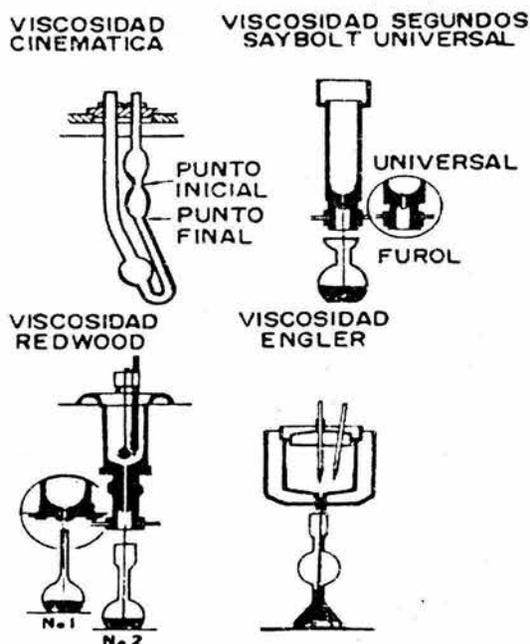
Los instrumentos de laboratorio para la medición de la viscosidad se conocen como viscosímetros, en los Estados Unidos los viscosímetros más utilizados son el cinemática y el Saybolt Universal, el viscosímetro Engler es utilizado en Europa, el Redwood en particular en Inglaterra.

El viscosímetro Saybolt, consiste en una copa de bronce cilíndrica en cuyo fondo hay un orificio de dimensiones específicas, alrededor de la copa hay un baño de temperatura constante. Cuando la muestra alcanza la temperatura de prueba se mide el tiempo requerido para que 60 ml del líquido pasen a través del orificio a una temperatura dada. La medida se identifica como SUS, segundos Saybolt Universales (SUS) por sus siglas en ingles.

En la determinación de la viscosidad cinemática, el tiempo es medido para un volumen fijo de muestra contenido en un viscosímetro de vidrio, que fluye a través de un capilar calibrado a condiciones de temperatura y presión controladas, la viscosidad se calcula por el tiempo de vaciado del recipiente, en la figura 3.9.2., se muestran los tipos de viscosímetros señalados.

(1,17)

Figura 3.9.2 Diferentes tipos de Viscosímetros utilizados en la medición de la viscosidad



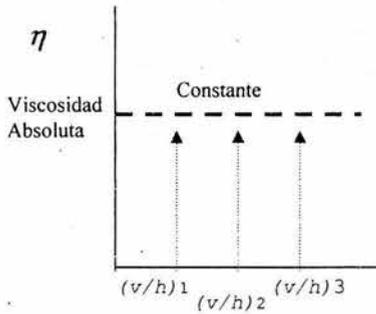
### 3.9.3 Fluidos Newtonianos y no Newtonianos

Otros factores de cambio en la viscosidad de un lubricante son la fuerza y velocidad de corte, que, en ciertos líquidos, no afectan de manera significativa su viscosidad. Los fluidos con este último comportamiento, se denominan fluidos Newtonianos., en el caso contrario cuando la fuerza y velocidad de corte inciden en el cambio de viscosidad, el fluido se denomina como No Newtonianos (18, 26). La mayoría de los aceites minerales utilizados para la fabricación de lubricantes, se comportan como fluidos newtonianos.

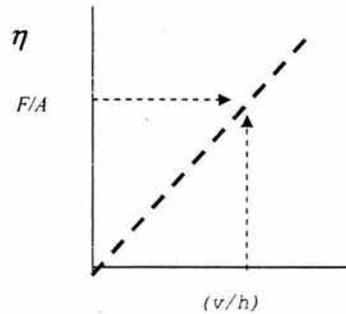
Cuando a un aceite o grasa lubricante se le adicionan materiales espesantes como polímeros, su viscosidad original se ve afectada y depende de la velocidad de deslizamiento a la cual se tome su medición, éstos fluidos reciben el nombre de no Newtonianos. Como el valor de su viscosidad depende de su velocidad de deslizamiento, se utiliza el término "Viscosidad Aparente", en unidades absolutas. Los materiales no newtonianos, se clasifican en cinco grupos, dependiendo del tipo de aglomerante utilizado en la reacción y son: plásticos, pseudo plásticos, dilatantes, tixotrópicos y reopécticos..

Los lubricantes entonces se pueden diseñar con éstas propiedades, para modificar su viscosidad de acuerdo a su aplicación específica. (Ver fig 3.9.3)

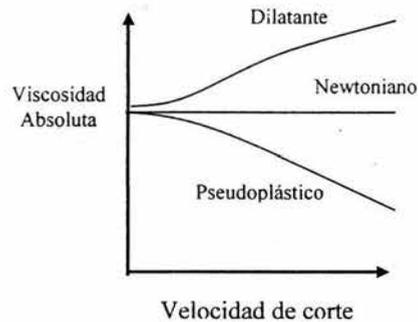
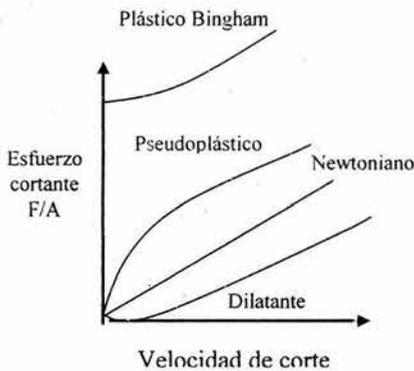
**Figura 3.9.3 Fluidos Newtonianos y no Newtonianos**



Velocidad de deslizamiento



El esfuerzo de corte es directamente proporcional a la velocidad de deslizamiento



Las propiedades de viscosidad como función de la velocidad de corte en un fluido, lo abarca el estudio de la Reología, el comportamiento No Newtoniano en general es función de la estructura interna del fluido. Los líquidos con estructuras moleculares flexibles como el agua y algunos fluidos con una alta dispersión de sólidos presentan comportamiento de tipo Newtoniano, en los denominados fluidos pseudoplásticos, éstos se hacen menos densos ó mas delgados con un incremento de la velocidad de corte. Estos fluidos se componen generalmente de largas moléculas las cuales están orientadas de manera aleatoria sin una estructura conectada. La aplicación de un esfuerzo de corte tiende a alinear las moléculas lo que provoca una disminución de su viscosidad aparente. En los fluidos que exhiben comportamiento dilatante, generalmente se “espesan” bajo esfuerzo de corte, éstos consisten de suspensiones con un alto contenido de sólidos y su comportamiento esta también relacionado con su reacomodo molecular. En los fluidos plásticos se requiere aplicar de una fuerza inicial antes de que su flujo se inicie, poseen una estructura tridimensional, que genera una resistencia al flujo molecular. Lo relevante en estos fenómenos, es que algunos lubricantes exhiben bajo ciertas

condiciones, comportamientos no newtonianos, mismos que deben de tomarse en cuenta en la selección adecuada de un lubricante, un ejemplo típico es el comportamiento de las grasas lubricantes, las cuales se comportan como fluidos plásticos. Los materiales cuya viscosidad es función de su velocidad de corte, se conocen como materiales Tixotrópicos.(29)

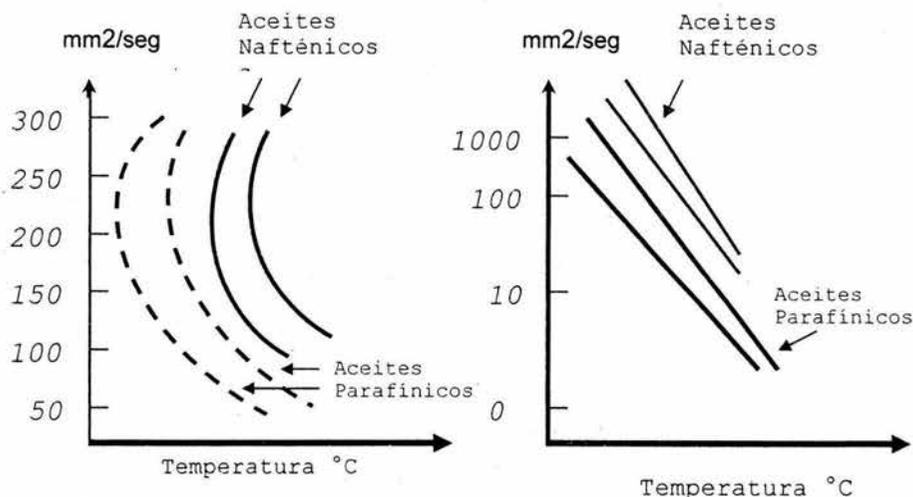
### 3.9.4 Viscosidad y temperatura

Como se comentó en un principio, la viscosidad de cualquier fluido cambia con la temperatura, se incrementa con la baja de temperaturas y disminuye con el aumento de la misma, también la viscosidad puede cambiar con los cambios en la fuerza de corte o velocidad de corte.

El método ASTM D-341, proporciona datos sobre viscosidades cinemáticas extrapoladas a varias temperaturas. En un plano cartesiano las curvas de Viscosidad -Temperatura (VT) de aceites de diferentes viscosidades representan brazos en una hipérbola, a nivel práctico se pueden obtener rectas logarítmicas donde se aprecia de mejor manera las diferencias entre diferentes aceites de origen parafínico o nafténico. La curvas VT se pueden hallar gráficamente conociendo dos valores de viscosidad a sus temperaturas respectivas, o por medio de la ecuación Ubbelohde-Walter:

$$\log. \log (V + C) = k - m \log.T$$

Fig.3.9.4 - Variación de la viscosidad con la temperatura



Gráficas típicas de Viscosidad - temperatura, las rectas son logarítmicas.

En la ecuación anterior:

V = Viscosidad en cSt ( o en mm<sup>2</sup>/seg) a la temperatura T (°C)

C = Constante para aceites minerales, varía entre 0.6 y 0.9; según la norma ASTM D-341 se toma 0.7

k = Constante para cada aceite en particular

m = Pendiente de la curva, esta influenciada por el índice de viscosidad (IV) de cada aceite

### 3.9.5 Índice de Viscosidad (IV)

Después de la viscosidad, el Índice de Viscosidad -IV -, es la característica más importante a tomar en cuenta en un lubricante, y se define como **la mayor o menor estabilidad de la viscosidad de un aceite lubricante con los cambios de temperatura**. Se señaló en 3.9.4 que la viscosidad de un aceite varía con la temperatura, pero esta variación no es constante para todos los lubricantes, depende del tipo de aceite base y del tratamientos en su refinación., por ejemplo un aceite nafténico se “adelgaza” más rápidamente con un incremento dado de temperatura que un aceite parafínico de la misma viscosidad. Recíprocamente un aceite nafténico se “espesa” más para una misma disminución de temperatura. La medición de la variación de la viscosidad vs. la temperatura es muy importante ya que en la gran mayoría de las aplicaciones deben de trabajar en un amplio rango de temperaturas. El índice de viscosidad IV, es una medida arbitraria para expresar esta variación. Cuando la medida del IV fue introducida hace más de cien años, los aceites destilados de Pensilvania presentaban una menor variación de la viscosidad con la temperatura cuando se comparaban con otros tipos de aceites., los aceite obtenidos de los pozos en Texas presentaban una mayor variación (ver gráfica 3.9.5), se determinó entonces el identificar a los aceites de Pensilvania con el numero IV de 100 (H en la gráfica) y los de Texas con el número IV de 0 (L en la gráfica) ya que presentaban un cambio mayor de su viscosidad respecto de la temperatura.

La variación de la viscosidad con la temperatura en el laboratorio de una aceite U, se compara contra estas dos medidas e indica el comportamiento relativo a estos dos estándares.

En el cálculo del IV, se mide la viscosidad de los aceites L, U y H a 100 °C, y se aplica la fórmula:

$$VI = \frac{L - H}{L - U} * 100$$

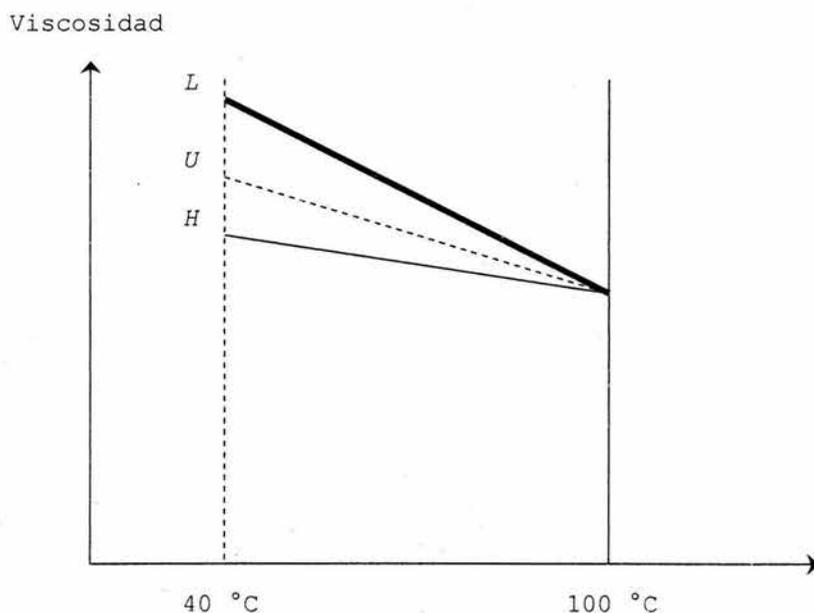
Es importante observar que pueden existir diferentes aceites lubricantes con similares ó idénticos índices de viscosidad, por ejemplo en una planta refinadora (antes del proceso de desparafinado), se pueden obtener mezclas de lubricantes de diferentes viscosidades. Estas pueden presentar en el laboratorio un alto índice de viscosidad, lo que a primera vista indicaría que se trata de un producto con alto contenido de hidrocarburos parafínicos, ideal para fabricar lubricantes con un adecuado comportamiento ante cambios bruscos de temperatura. Sin embargo la mezcla de dos hidrocarburos de diferente viscosidad pero con igual IV, puede presentar en la mezcla final un IV mayor que la de sus componentes originales.

Es común que el IV se utilice para caracterizar la calidad de una aceite terminado, pero este puede ser obtenido por la mezcla de aceites parafínicos y nafténicos o que haya sido

“aditivados” con compuestos que mejoran el comportamiento del IV., pero no nos dice nada acerca de su comportamiento, como lo es su resistencia a la oxidación, ya que en la práctica este se podría comportar como un aceite Nafténico más que Parafínico. Por eso se debe de tener cuidado que el IV descrito en un aceite sea “natural” u “original”, es decir con la mínima mezcla o aditivación posible.

La ASTM en sus pruebas D-341 y D-2270, genera gráficas de cSt vs. Temperatura (°C) de manera logarítmica, y establece estándares de medidas de viscosidad para aceites minerales derivados del petróleo, de donde se pueden obtener diversos valores de IV para diferentes aceites. Afortunadamente la viscosidad de productos derivados del petróleo en función de la temperatura, varía de manera predecible, de tal forma que las viscosidades medidas a dos temperaturas sirven de referencia para predecir otras viscosidades a diferentes temperaturas. La temperatura mínima de un aceite mineral derivado del petróleo está limitada por la temperatura de floculación, debido al inicio de la precipitación y formación de “cristales de cera”, por otro lado, la temperatura máxima, depende de la volatilidad, flamabilidad y descomposición térmica del fluido. El IV no sólo se limita al rango de 0 a 100, puede calcularse para valores superiores de 200 ó más, como en el caso de lubricantes sintéticos ó aceites minerales aditivados con polímeros (8, 15).

Gráfica 3.9.5 - Índice de viscosidad IV



El método de cálculo del IV esta normado por las pruebas estándares ASTM D-2270, BS 4459, DIN 51564.

En la práctica en operaciones con altas temperaturas mayores a 80 °C; la película lubricante puede adelgazarse hasta llegar a romperse facilitando el contacto metálico, o por el contrario en bajas temperaturas menores a - 5 °C puede llegar a incrementarse impidiendo el libre flujo en conductos de un sistema. Bajo estas condiciones de funcionamiento, es necesario que la viscosidad del aceite tenga un elevado IV, para que ofrezca una estabilidad y protección adecuada ante cambios de temperatura severos.

Entre mayor sea el IV natural de un lubricante, más estable es será su viscosidad, por consiguiente es recomendable utilizar en lo posible aceites con altos valores de IV. El valor del IV de un aceite base sin aditivos o natural es entonces indicativo de su calidad.

El valor del IV se evalúa generalmente en aceites nuevos, en aceites usados puede dar un valor incorrecto de la estabilidad del aceite, Sin embargo si se analiza, un incremento o disminución del IV original, puede indicar contaminación ó baja resistencia o falta de aditivos mejoradores del IV (1, 10). En la siguiente tabla se muestran rangos típicos de diversos valores de IV.

**Tabla 3.9.5 Clasificación del Índice de Viscosidad IV**

Grupo	IV ( Viscosidad cinemática)
Índice de viscosidad bajo (LVI)	Debajo de 35
Índice de viscosidad medio (MVI)	35 – 80
Índice de viscosidad alto (HVI)	80 – 100
Índice de viscosidad muy alto (VHVI)	Arriba de 110

### 3.10 Fabricación de un lubricante

La materia prima fundamental en la fabricación de los aceites lubricantes son los aceites minerales derivados del petróleo. Los lubricantes están fabricados de la parte más espesa del petróleo crudo, son llamados también aceites “minerales”, “crudos”, “neutros” ó “básicos”.

No obstante de existir diferencias en los diversos tipos de petróleo crudo en diversas partes del mundo, su naturaleza es muy similar: del 83 al 87% de Carbono y del 11 al 14% de Hidrógeno. El resto de componentes restantes, comprenden al Oxígeno, Nitrógeno, Azufre y algunos compuestos metálicos. Sin embargo, la gran cantidad de combinaciones naturales en que se encuentran estos compuestos en el mundo, proporciona una gran diferencia de propiedades físicas y químicas, que inciden directamente sobre la calidad y precios de los aceites obtenidos para la fabricación de un lubricante.(12)

Para tener una idea de la complejidad de los procesos de refinación, para la obtención de los aceite bases o minerales, consideremos que una sola molécula de un hidrocarburo, que contenga por ejemplo 25 átomos de Carbón (cantidad común en un aceite mineral lubricante), tiene 52 átomos de Hidrógeno. Este compuesto puede tener más de 37,000,000 diferentes tipos de arreglos moleculares cada uno con propiedades específicas, si consideramos que también existen productos nafténicos y aromáticos con 25 átomos de carbón, la posible variación molecular es inmensa. (13)

Como resultado de lo anterior y con el objetivo de minimizar éstas variaciones, los fabricantes seleccionan rangos y productos que proporcionen propiedades específicas y consistentes para las diversas aplicaciones industriales, éstos son:

- ◆ Selección de aceites crudos con rangos de hidrocarburos determinados
- ◆ Destilación de los crudos para la obtención de fracciones conteniendo similares puntos de ebullición.
- ◆ Procesamiento para separar los componentes indeseables o convertir algunos de éstos en materiales convenientes.
- ◆ Mezcla de productos para impartir propiedades específicas o añadir productos químicos para mejorarlas o impartirlas

En forma condensada, podemos entonces decir que existen por lo tanto, dos formas esenciales para la fabricación de un aceite lubricante:

- Productos derivados de la refinación del petróleo crudo
- La síntesis de compuestos relativamente puros con propiedades lubricantes definidas

El petróleo es una mezcla de hidrocarburos con diferentes contenidos de otras sustancias según su precedencia. La composición elemental media del petróleo es ( 12, 13 ) :

Carbono	( C )	82	- 87 %
Hidrógeno	( H )	10	- 15 %
Azufre	( S )	0.01	- 7 %
Oxígeno	( O )	0	- 2 %
Nitrógeno	( N )	0	- 0.8 %
Metales		0	- 0.1 %

El petróleo crudo entonces, lleva un proceso de refinación, que en el caso de la obtención de aceite base para la fabricación de lubricante, se aplican, en la mayoría de los casos, los siguientes procesos (esquema 3.10)

- a) Separación por destilación al vacío
- b) Desfaltación con Propano
- c) Extracción con Furfural
- d) Separación de ceras con Metiletilcetona (MEC)
- c) Hidrotratamiento

### 3.10.1 Aceites Básicos

Desde el punto de vista comercial, las grandes petroleras, cotizan sus productos al mercado considerando las propiedades de los aceites bases más importantes para la fabricación de un lubricante, como lo es su rango de viscosidad y composición. El costo de la formulación final, calidad y aplicación, dependen en gran medida del aceite base seleccionado. Mientras que en los países donde el invierno es crudo se requieren por ejemplo, productos de baja viscosidad, en los países cálidos se requieren aceites con alta viscosidad. La decisión en el mercado de los aceites bases o vírgenes y la selección de propiedades fisicoquímicas especiales, finalizara siempre en una decisión económica.

En México los aceites base obtenidos como materias primas para formuladores de aceites lubricantes, no tienen las bondades ni las propiedades naturales, como los aceites obtenidos en pozos en el Medio Oriente, y sus precios en el mercado mundial, son generalmente menores que éstos, debido a la calidad natural de los mismos.

Algunas de las propiedades más importantes en la caracterización de un lubricante base para la preparación de un lubricante son:

- Baja volatilidad bajo diversas condiciones de operación
- Características satisfactorias de flujo a diferentes temperaturas
- Buena estabilidad a la oxidación en periodos razonables de tiempo
- Compatibilidad con otros materiales del sistema

Todas las propiedades anteriormente descritas pueden mejorarse con la aplicación de aditivos químicos con excepción de la primera característica, estos aditivos se formulan en cantidades y características perfectamente definidas para proporcionar un comportamiento superior del lubricante, dependiendo de su aplicación, será el tipo de aditivo a añadir al aceite base. (1,2,10)

A continuación se describen algunas de las propiedades generales de los aceites de los aceites básicos, cabe señalar que los refinadores de lubricantes, seleccionan los aceites crudos siguiendo los siguientes criterios:

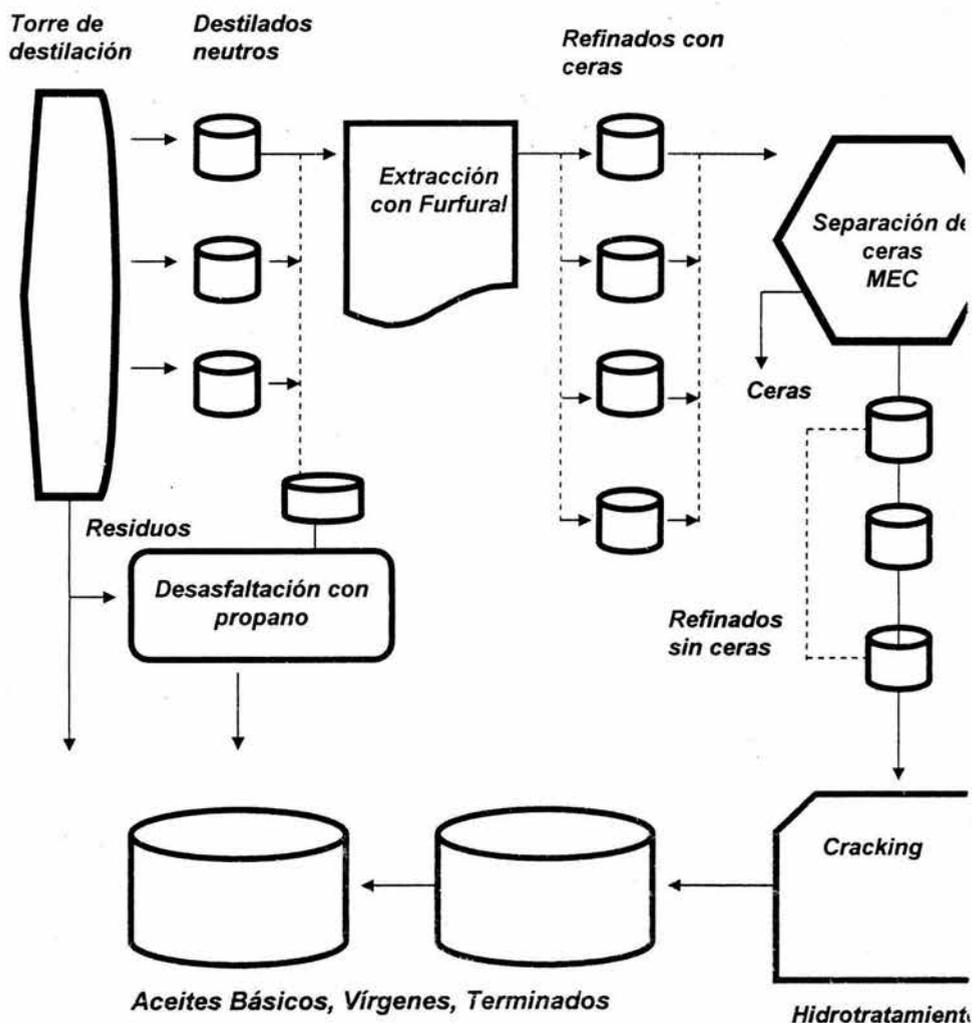
- ◆ Naturaleza química – Nafténica ó Parafínica
- ◆ Gravedad específica y viscosidad del crudo
- ◆ Impurezas
- ◆ Rendimiento

Cabe señalar que en la actualidad, los fabricantes de aceites base deben especificar el tipo de aceite y el proceso por el cual se refinó, en particular los obtenidos por destilación fraccionada. Existen refinerías que comercializan éstos productos los cuales sólo han sufrido un tratamiento de tipo físico, pero no de tratamiento químico para su purificación final. En las condiciones anteriores los organismos de sanidad en particular en los E.U., como la OSHA, reportan como productos cancerígenos a los aceites base no tratados adecuadamente ó que se han tratado sólo por destilaciones de tipo atmosférico (27).

Las propiedades finales de rendimiento, viscosidad e índice de viscosidad y estabilidad química de un aceite lubricante, dependerán de la mezcla y cantidades de aceites de tipo parafínico, nafténico y asfálticos presentes, algunas características de éstos son:

Aceites parafínicos	Índice de viscosidad (IV); Aproximadamente 100
Aceites Nafténicos	Índice de viscosidad (IV); Aproximadamente 0 a 50

**Esquema 3.10 - Diagrama de flujo de la obtención de aceites base para la fabricación de lubricantes**



Como señalamos anteriormente, un número menor de IV representa en cambio significativo en su viscosidad respecto de un cambio en la temperatura, lo que no es conveniente en la mayoría de las operaciones industriales. Por otro lado, los aceites con base de origen parafínico, son más demandados en la fabricación de lubricantes por mejor presentar mejor estabilidad a la oxidación, menor volatilidad y demulsibilidad.

Puesto que, no todos los aceites base son equivalentes o tienen la misma eficiencia para la fabricación de un lubricante, y se dificulta en la práctica la adecuada selección de los mismos, la API proporciona tablas y guías para un adecuado comportamiento y eficiencia de los aceites base, en particular en aceites de motor, a continuación se describe esta equivalencia, donde se definen los parámetros físicos de estos materiales., se establecen cinco tipos de aceites base equivalentes para formular o sustituir un aceite base en el mercado (4, 12)

**Cuadro 3.10.1 Equivalencias API de aceites base.**

Categoría de aceite base	(%) de Azufre		(%) Hidrocarburos saturados	Indice de Viscosidad
Grupo I	> 0.03	Y / O	< 90	80 a 120
Grupo II	< = 0.03	Y	= < 90	80 a 120
Grupo III	< = 0.03	Y	> = 90	> = 120
Grupo IV	Todas las polialfaolefinas (PAOS)			
Grupo V	Todas los otros no incluidos en los Grupos I, II, III, ó IV.			

En la actualidad las tecnologías de los procesos de refinación pueden producir aceites base con índices de viscosidad mayores a 100 prácticamente de cualquier tipo de “crudo”. Lo anterior facilita la obtención de aceites base de bajo peso molecular con propiedades y ventajas adicionales contra los aceites comerciales convencionales, estos productos son muy demandados en el mercado., ya que permiten a los formuladores de lubricantes hacer mezclas específicas de diversas fuentes a bajo costo.

El avance en nuevas tecnologías de “craqueo” catalítico de grandes moléculas y los procesos de hidroisomerización, también brindan la oportunidad de “jugar” con diversos materiales para elaborar productos semisintéticos de características definidas que superan las propiedades originales y resistencia de los aceites base de origen. Estos productos son conocidos como aceites base “hidrocraqueados” o “hidrotratados” y en la actualidad presentan cada vez mayor demanda, no nada mas por sus excelentes propiedades, sino por su costo accesible a los formuladores. No todas las petroleras o fabricantes cuentan con estas tecnologías y se estima que en un futuro cercano dichos materiales van a penetrar el mercado de fabricación de los grandes fabricantes de lubricantes (27).

Los lubricantes formulados con estos aceites base, presentan múltiples ventajas como las siguientes:

- Mayor resistencia a la oxidación.
- Mayor resistencia al cambio con la temperatura ( mayores IV)
- Mayor resistencia de película y al corte.
- Alta compatibilidad química con aditivos.
- Menor cantidad de residuos de Azufre.
- Puntos de congelación y de ignición mas altos.
- Precios altamente competitivos hacia el consumidor final

**Tabla 3.10.2 - Viscosidad típica en aceites básicos para la fabricación de lubricantes**

Aceite	Dinámica o Absoluta (mpas)	Dinámica o Absoluta (mpas)	Dinámica Cinemática (mpas)	Dinámica Cinemática (mpas)
	A 40°C	A 100°C	A 40°C	A 100°C
Aceite neutro "Ligero"	7.9	2.1	9.2	2.5
Aceite neutro "Pesado"	1065	50.8	1162	55.4

**Tabla 3.10.3 - Características de aceites crudos o básicos para la fabricación de un lubricante**

Tipo de aceite base	Características	Aplicación	Nombres comerciales
Parafínicos	Ceras 10 - 20 % Hidrocarburos saturados : cadenas largas Indice de viscosidad : 95 – 105	Aceites de motor e industriales	Brigh Stocks
Nafténicos	Ceras 5 - 10 % Contiene hidrocarburos saturados , cíclicos Indice de viscosidad : bajo - medio 30 – 70	Aceites industriales, particularmente de refrigeración	Lube Stock Aceites neutros
Asfálticos	Contiene alto índice de hidrocarburos aromáticos (insaturados). Mínimo contenido de grasas Indice de viscosidad 0 a 50 ó negativo	Aceites industriales para engranes abiertos	
Mezclas básicas	Generalmente se tratan en proceso para obtener propiedades similares a los parafínicos como alto IV y baja concentración de aromáticos.	Aceites de motor e industriales	Lube Stocks Aceite neutro

Por otro lado, estos productos cumplen y exceden los requisitos de calidad de lubricantes formulados para los principales fabricantes automotrices en el mundo

Hasta la primera década de nuestro siglo, los lubricantes fabricados se utilizaban en la industria prácticamente puros ó al final de la etapa de purificación de la refinería, sin embargo a medida que los avances en la industria y el transporte se desarrollaron, fue necesario incrementar las propiedades originales de los lubricante, y fue necesario “añadir” productos ajenos al lubricante original, con el fin de mejorar su propiedades lubricantes, surge así el desarrollo de los aditivos químico. En la actualidad, un lubricante moderno, es una maravilla tecnológica, que implica formulaciones y balances perfectos para lograr los rendimientos y eficiencias extraordinarios.

En la Tabla 3.10.1, y 3.10.2., se muestran algunos tipos y características de los aceites básicos derivados del petróleo y su utilización en la fabricación de lubricantes.

### 3.10.2 Aditivos

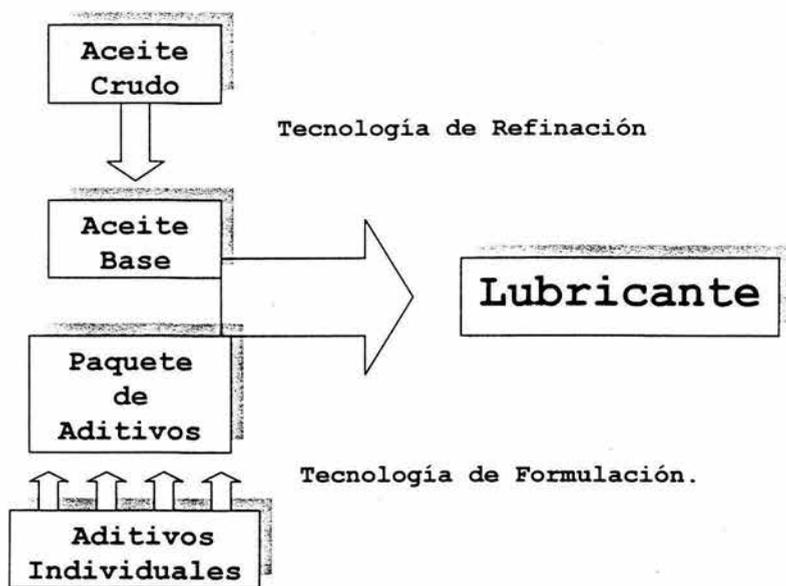
Los aditivos son materiales, generalmente productos químicos, que son añadidos a los aceites base en la elaboración de un lubricante ( ver figura 3.10.2), con el objetivo de mejorar alguna propiedad específica, los aditivos cuando son apropiadamente formulados en un lubricante, incrementan su vida útil, proveen gran resistencia a la corrosión, aumentan su capacidad de carga, mejoran su índice de viscosidad y realzan otras características físicas, sin embargo los aditivos son compuestos muy complejos y por lo tanto no se debe de hacer uso indiscriminado de los mismos como si fuesen una cura para todos los problemas de lubricación.

Existen tres tipos de aditivos primordiales, aquellos que mejoran una o varias las propiedades originales del aceite virgen, aquellos que imparten nuevas propiedades, y finalmente aquellos que controlan propiedades o comportamientos no deseados en el aceite básico original. Es muy importante señalar que al ser los aditivos componentes ajenos al fluido original, éstos deben formularse y mezclarse bajo cuidados adecuados en su elaboración ya que, mientras una propiedades se mejoran, otras pueden verse afectadas en forma acelerada (esquema 3.10.2a).

En el mercado comercial de los aditivos, éstos se fabrican y venden en “paquetes” balanceados que incluyen no sólo uno sino varios de los aditivos mencionados, que están ligados al tipo de aplicación del lubricante final así como a la naturaleza del aceite base a utilizar, de ahí que, es de suma importancia tanto para el usuario como para el diseñador o fabricante de lubricantes, la selección correcta del paquete de aditivos adecuado en conjunción con la calidad de aceite base, para la obtención de un lubricante de alta calidad. Los porcentajes de los productos comerciales, varían generalmente desde 0.1 a 30% en promedio, la composición de un aceite lubricante es particular para cada aplicación, la competencia tecnológica en el campo de la investigación y el desarrollo de nuevos aditivos cada vez en más grande, y tiende hacia el futuro a acrecentarse debido las exigencias de calidad, resistencia fisicoquímicas, ecología y requisitos y diseños de las nuevas maquinas modernas.(27)

Las compañías fabricantes generalmente compran “comportamiento” pero no química, en la práctica, interesa más la eficiencia y comportamiento de los aditivos, que el mecanismo o la química de su comportamiento, sin embargo de la investigación y desarrollo de éstos, depende su eficacia. La innovación y desarrollo de nuevos aditivos esta íntimamente ligado a su relación costo-beneficio, que es la que finalmente determina su éxito comercial.

### Esquema 3.10.2 Formulación de un lubricante



Las decisiones del perfil de aditivo óptimo, están determinadas por el fabricante del aditivo y el del aceite lubricante., por tal motivo existen especificaciones de origen americanas, europeas, japonesas, y el número de pruebas estándares varían en consecuencia. El desarrollo de un nuevo aditivo, se inicia con el análisis de aceite base, su origen, composición y propiedades, y su compatibilidad química con el aditivo, esto establecen las base de diseño y compatibilidad del nuevo aditivo a desarrollar.

La API, SAE, ASTM, CCMC, MIL y los fabricantes automotrices y de equipos industriales, establecen los requisitos de las nuevas formulaciones requeridas, en este sentido, las grandes empresas fabricantes de lubricantes y aditivos, siempre se enfocarán a desarrollar aditivos y lubricantes que cumplan con todos los estándares de comportamiento establecidos. El costo de tal carrera tecnológica para sobrevivir en este mercado es muy alto e implica un gran esfuerzo tecnológico de las grandes empresas fabricantes en el mundo (10).

En este nuevo siglo, se proyectan nuevos retos para los fabricantes y formuladores de aditivos y lubricantes, por ejemplo, en las maquinas de combustión, los nuevas alternativas de combustibles como alcoholes, gas u otros, requieren nuevos desarrollos de aditivos químicamente compatibles con los primeros, las nuevas máquinas turbocargadas de mayor potencia, temperatura, velocidad y eficiencia, requieren a su vez de nuevas propiedades en los mismos. Otro factor que presiona el desarrollo de nuevas tecnologías es el mercado de los

combustibles y su racionalización, el control del consumo de diesel y gasolina, presenta uno de los mayores retos que la química de los aditivos debe de resolver para cumplir con las nuevas exigencias.

Finalmente los requisitos de ecología, el control de las emisiones de los motores de combustión al medio ambiente y el control de los desechos lubricantes usados, representa otro reto a resolver, donde la química y propiedades de los nuevos aditivos y lubricantes, jugarán en un corto plazo un papel estratégico en el mercado de la lubricación mundial.

De lo señalado hasta ahora, podemos afirmar que la eficiencia de un lubricante en el mercado, depende en una gran medida, de la calidad del tipo de aceite base utilizado y de los aditivos seleccionados para su formulación.

En la tabla (3.10.2 b), se muestra una tabla de los principales tipo de aditivos utilizados en una la mayoría de los lubricantes comerciales, la concentración de cada componente varía en función de su aplicación específica.

Como se ha señalado anteriormente, las superficies durante la fricción, pueden deteriorarse a causa de: desgarramiento, deformación plástica, fatiga, desgaste mecánico, corrosión y por fallas en la tecnología de acabado superficial, entre las principales causas.

El desgarramiento ocurre sólo en régimen de lubricación límite, puede surgir por ejemplo, entre los dientes de los engranajes sometidos a elevadas cargas como en las transmisiones hipoidales de los automóviles, en los cojinetes o chumaceras planas, y menos frecuentemente en los rodamientos.

El desgarramiento ocurre como consecuencia de la adhesión de las superficies de fricción, principalmente cuando éstas están limpias, es decir libres de películas de absorción, lo cual puede presentarse en el proceso de deformación plástica o durante un sobrecalentamiento, que conduzca a la rotura de las películas de absorción (16).

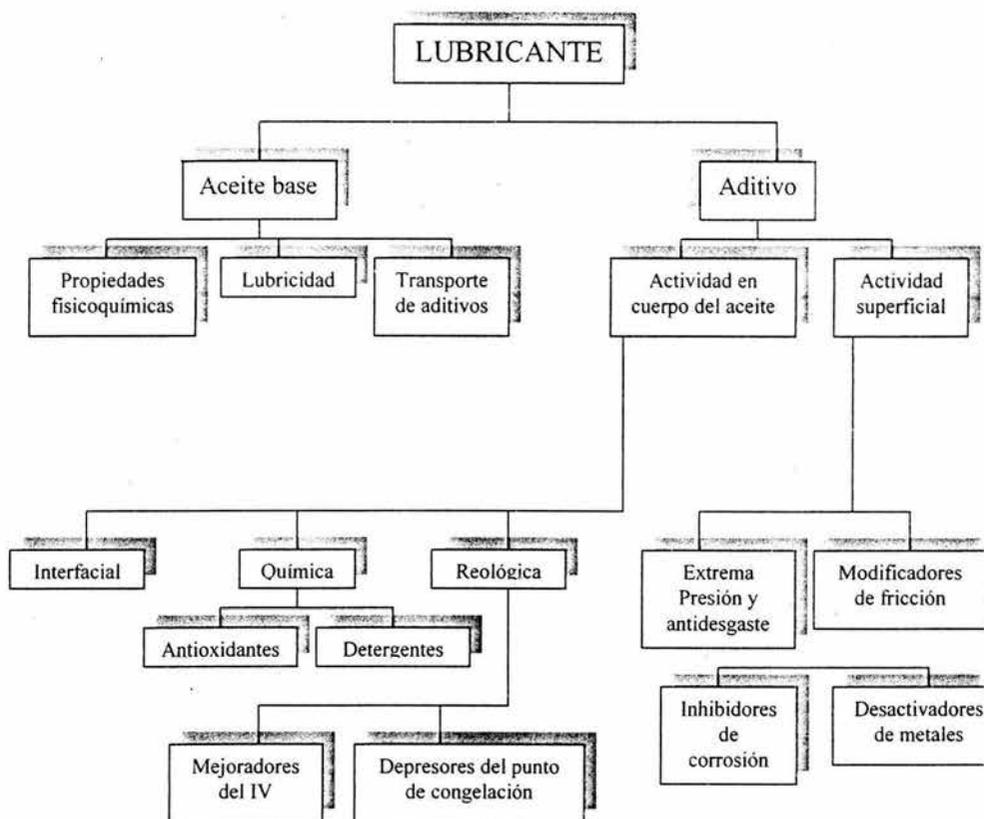
De los aditivos que actúan sobre las superficies metálicas en contacto, se demanda que garanticen películas resistentes, tal que la resistencia al cizallamiento sea menor en la película formada, que la resistencia de las capas de materiales que protegen.

El desgaste mecánico se origina por los contactos intermitentes entre las microrugosidades de las superficies de fricción, el que con mayor o menor intensidad, es inevitable en la práctica (particularmente en las arrancadas y paradas de los equipos). Por esta causa existe el desprendimiento progresivo de partículas metálicas que salen de la zona de fricción con la consecuente pérdida de masa de la pieza. El control de este tipo de desgaste se logra eficientemente con lubricantes aditivados, que aseguren una adecuada capa de adsorción en las condiciones de lubricación límite (19).

El desgaste por fatiga que surge debido a la acción de tensiones cíclicas de contacto en las capas superficiales del metal, dan como consecuencia grietas profundas de fatiga, desarrollando picaduras y escamas, como es posible apreciar en las pistas de los rodamientos, en las caras de los dientes de los engranajes, en los conjuntos de levas, etc.

La reducción del desgaste por fatiga es posible con el empleo de materiales adecuados y el uso de lubricantes aditivados con compuestos que transforman este tipo de desgaste con frecuencia catastrófico, en benigno desgaste corrosivo. Los tipos de aditivos que actúan en estos procesos de fricción se pueden dividir en tres tipos principales: (a) Antifricción, necesarios para estabilizar y reducir la fricción. (b) Antidesgaste, estabilizan y reducir el desgaste progresivo en cargas moderadas. (c) De extrema presión (EP): evitan el desgarre de las superficies en contacto.

### Esquema 3.10.2 a - Clasificación de aditivos



De acuerdo con la división anterior, los aditivos antioxidantes y anticorrosivos, forman en primer plano, una parte integral de la formulación de un lubricante. Estos aditivos se analizan en conjunto, ya que muchos de ellos son bifuncionales y, aunque actúan con diferentes mecanismos, al final sus acciones son coincidentes. La principal función de estos materiales es el de prevenir y frenar el deterioro del aceite base durante su explotación y uso, neutralizando la acción de los radicales libres y ácidos formados durante los procesos de oxidación y corrosión del aceite y los metales (iones de hierro o cobre) presentes en el sistema. Los aditivos inhibidores de corrosión, previenen el ataque “ácido” en las superficies de los metales (por ejemplo en los rodamientos), formando una capa protectora en las superficies de contacto.(4)

**Tabla 3.10.2b Principales tipos de aditivos utilizados en la formulación de lubricantes.**

Tipo de Aditivo	Motor de combustión	Dirección Hidráulica ATF	Transmisión automotriz	Aceites hidráulicos	Aceites de engranes	Aceites de turbinas	Fluidos de corte	Aceites hidráulicos antifuego
Detergentes	B	O						
Dispersantes	B	B						
Antioxidantes	B	B	B	B	B	B		
Antidesgaste	B	O	B	O	B	O		B
Inhibidores de herrumbre	B			B	B	B		
Inhibidores de corrosión	B	B	B	B	B	B	B	B
Modificadores de fricción	B		B		B		G	
Agentes de extrema presión EP		B	B		B		B	G
Agentes anti-espuma	B	B	B	B	B	B	O	
Mejoradores del IV	B	B						
Depresores del punto de congelación	B	B	B					O
Inhibidores químicos en sellos			O					
Desactivadores de metales			G	G	O			

**B= Aditivo base principal.**

**G= Aditivo secundario utilizado**

**O= Aditivo opcional.**

Como se puede observar en la figura 3.10.2., se muestra el mecanismo típico de oxidación de un lubricante, puede notarse que al final de la cadena, se forman ácidos orgánicos (contaminantes corrosivos), quedando un radical hidrocarburo libre, dispuesto a continuar la cadena de reacciones de radicales peróxidos. Los compuestos obtenidos por el mecanismo anterior provocan la degradación de los aditivos, la formación de “gomas” y “lacas” indeseables, que afectan directamente la vida útil del lubricante., operacionalmente pueden taponar conductos que impiden la adecuada circulación del aceite y generan costos adicionales para su eliminación y limpieza (5)

Algunos tipos de aditivos, como por ejemplo los tiocarbamatos, actúan desactivando los catalizadores en la reacción inicial y otros como los tiofosfatos que reducen los peróxidos formados, impidiendo en cualquiera de los casos, la continuación de la cadena de reacciones.

La actividad de los aditivos antioxidantes es de suma importancia en la práctica, ya que previenen la formación de peróxidos indeseables generados por altas temperaturas de trabajo, este fenómeno se presenta en prácticamente todas las operaciones industriales y todos los lubricantes están sujetos dicha degradación.

Existen otros aditivos que protegen de la corrosión química que forma el herrumbre y la corrosión metálica en partes de bronce y metales blandos., otros actúan sobre las propiedades reológicas del lubricante para mejorar su fluidez, punto de congelamiento o bombeabilidad, en condiciones de operación de película límite, donde el riesgo de alto desgaste superficial y microsoldadura es evidente, se requieren los aditivos denominados antidesgaste (AW) y de extrema presión (EP), que actúan formando un filmes y compuestos protectores en las superficies de contacto, reduciendo el contacto metal-metal y la probabilidad de microsoldadura y desgaste adhesivo (4).

Es importante señalar que, cuando un lubricante se fabrica con la calidad adecuada y siendo un producto químicamente balanceado, no es necesario añadirle aditivos extras a los productos nuevos o usados, ya que los resultados pueden ser contraproducentes, además de generar gastos extras en el costo de la lubricación. Es común encontrar en el mercado empresas que ofertan aditivos complementarios o productos aditivos "mágicos" que en apariencia ayudan a sobreproteger una máquina, la practica ha demostrado que se debe tener mucho cuidado en la aplicación de este tipo de productos, sobre todo si no demuestran o poseen pruebas de calidad certificadas internacionalmente, pruebas certificadas de campo, recomendaciones de fabricantes originales, condiciones y consecuencias de su aplicación, ya que como hemos revisado hasta el momento, un sistema tribológico depende de muchas variables externas, que como se señaló, pueden afectar los balances y formulaciones de los lubricantes originales. Generalmente no es necesario aditivar o reforzar un producto de calidad debidamente formulado para una aplicación específica.

Se ha señalado que un aceite lubricante puede degradarse durante su uso primordialmente por tres factores: oxidación, degradación térmica y contaminación. Los aceites minerales son relativamente estables a la descomposición térmica en ausencia de Oxígeno, sin embargo a temperaturas superiores a los 330 ° C, dependiendo del tiempo, estos aceites se descomponen en fragmentos, algunos de los cuales se polimerizan formando compuestos insolubles duros, que pueden acelerar el proceso de desgaste superficial. Algunos aditivos son más sensibles a la descomposición térmica que el aceite base que los contiene, por ejemplo los aditivos de extrema presión tienen limitaciones de trabajo hasta los 130 °C, temperatura a las cual se degradan.

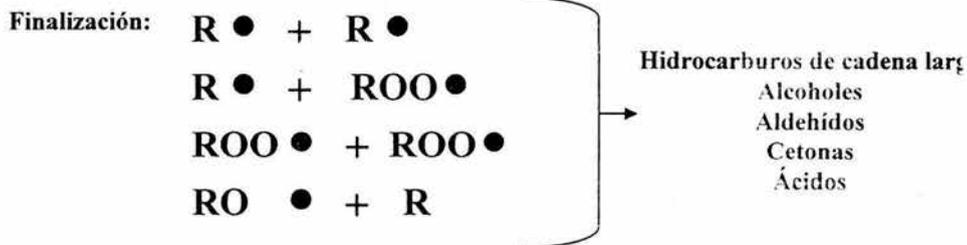
Los fabricantes de equipo original, indican en sus manuales de mantenimiento los tipos de aceite o grasa lubricante a utilizar, indicando ya en la actualidad el tipo de aditivo o aditivos mínimos que debe de contener el lubricante recomendado en sus equipos, es muy importante que los proveedores de lubricantes, así como los usuarios, cumplan con estos requisitos para garantizar el rendimiento adecuado de sus equipos.

Los aditivos de extrema presión, dado que su forma de protección superficial consiste en la formación de capas de productos de origen inorgánico, son recomendables para equipos donde los elementos mecánicos sean de acero y no contengan aleaciones o metales blandos como el bronce, ya que aceleran la formación y oxidación de las superficial. En equipos a lubricar con partes de bronce, se deberán de aplicar lubricantes sin aditivos EP o especiales para este tipo de metales.

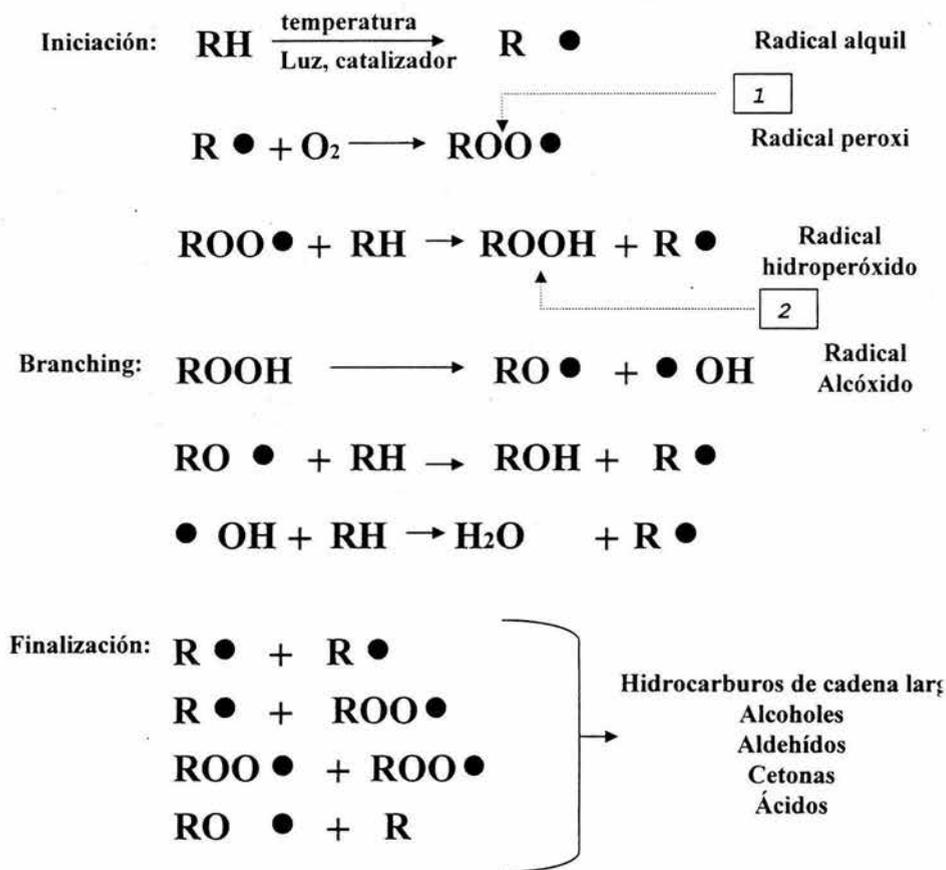
### 3.10.2.c Mecanismo típico de oxidación de un lubricante:

Radicales peróxidos:  $\text{ROO} \bullet$

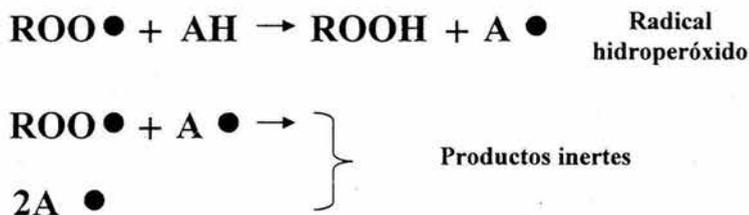
Hidroperóxidos:  $\text{ROOH}$



### 3.10.2.d Mecanismo de actividad antioxidante



Mecanismo de actividad primaria en la protección antioxidante:



**Tabla 3.10.2c Descripción de Aditivos Químicos y su función específica**

<b>Sustancia Activa</b>	<b>Compuesto Químico</b>	<b>Campo de aplicación</b>	<b>Mecanismo de Acción</b>
Inhibidores de oxidación	Fenoles inhibidos Aminas Sulfuros orgánicos Ditiofosfatos de Zinc	Minimizar la formación de resinas, lacas, lodos, ácidos y polimeros.	Finalizar la reacción en cadena de oxidación, reduciendo los peróxidos orgánicos. Reducir la formación de ácido por absorción reducida de oxígeno por el aceite, inhibir las reacciones catalíticas.
Inhibidores de corrosión	Ditiofosfatos de Zinc Terpenos sulfurados Terpenos fosforados Sulfurados Olefinas sulfuradas	Protección de la superficie de cojinetes y otros metales contra la corrosión	Acción como anticatalizadores, formación de película sobre la superficie metálica para protección contra el ataque de ácidos y peróxidos.
Inhibidores de herrumbre	Aminofosfatos, ácidos grasos, sulfonatos de sodio, calcio y magnesio. Acidos alquilsuccínico	Protección de superficies metálicas con contenido de hierro contra la herrumbre	Las moléculas polares son adsorbidas preferentemente sobre la superficie metálica y sirven como barrera contra el agua. Neutralizan los ácidos.
Compuestos desactivadores de metales	Triaril-fosfitos, diaminas Compuestos de azufre Derivados de dimercaptotiadiazol	Supresión de la influencia catalítica sobre la oxidación y la corrosión.	Sobre las superficies metálicas se deposita una película protectora que impide el contacto del metal base con las sustancias corrosivas.
Sustancias activas contra el desgaste ( antiwear)	Dialquilditiofosfatos de zinc Fodfatos de tricresilo	Reducción del desgaste excesivo entre las superficies metálicas	Por reacción con las superficies metálicas se generan capas que se deforman plásticamente y mejoran la zona de contacto.
Sustancias activas contra el gripado (EP) Extrema – presión	Grasas y olefinas sulfuradas Hidrocarburos clorados Sales de plomo en ácidos orgánicos. Aminofosfatos	Prevención de microsoldaduras entre las superficies metálicas a altas presiones y temperaturas.	Por reacción con las superficies metálicas se generan nuevos compuestos con menor resistencia al cizallamiento que el metal base. Proceso con sacrificio de superficie.

Modificadores de fricción	Acidos grasos Aminas grasas Lubricantes sólidos	Reducción de la fricción entre las superficies en contacto	Moléculas altamente polares se depositan sobre las superficies metálicas y separan las superficies. Los lubricantes sólidos forman películas superficiales reductoras de fricción.
Sustancias activas detergentes	Sulfonatos, fenolatos, o fosfanatos de calcio, bario o magnesio, normales o básicos.	Reducción o prevención de sedimentaciones en motores a altas temperaturas de funcionamiento.	Control de la generación de lacas y lodos, por medio de la reacción de los productos de oxidación resultando productos solubles en aceite o suspendidos en aceite.
Sustancias activas dispersantes	Polímeros como polimetacrilatos, alquilsuccinimidas con contenido de nitrógeno, así como succinatos aminas y amidas de alto peso molecular.	Prevención o retardación de la formación de depósitos de lodos en bajas temperaturas de servicio	Los dispersantes tiene una marcada afinidad a las impurezas, recubriéndolas con moléculas oleosolubles que impiden la aglomeración y sedimentación del lodo en el motor
Reductores del punto de fluidez crítico.	Naftalenos y fenoles alquilados sin parafina. Plimetacrilatos	Reducción del punto de fluidez crítico	Prevención de la aglomeración de cristales de parafina por medio de "recubrimientos"
Mejoradores del índice de viscosidad	Poliisobutilenos Polimetacrilatos Poliacrilatos Poliétileno-propileno Copolímeros de estireno-ésteres de ácido maléico Copolómeros de estireno-butadieno hidrogenados.	Reducción de la dependencia de la viscosidad con la temperatura.	Las moléculas de polímeros están fuertemente enredadas en un disolvente no adecuado (aceite frío) y en un buen disolvente (aceite caliente), ocupan un mayor volumen al desenredarse, con lo que se obtiene un espesamiento relativo del aceite.
Inhibidores de espuma	Polímeros de silicona Fosfato de tributilo	Prevención de la formación de espuma estable	Rodeando microburbujas de aire, reducen su tensión de superficie límite, generando la formación de burbujas más grandes que suben a la superficie
Mejoradores de la adhesión	Jabones, Poliisobutilenos y polímeros de acrilato	Aumento de la adhesión del aceite	Aumento de la viscosidad. Las sustancias activas son tenaces y pegajosas.

Emulsionantes, emulsificantes	Sales sódicas de ácidos sulfónicos y otros ácidos orgánicos Sales de aminas grasas	Emulsión de aceite en agua	Reducción de la tensión de superficie límite con la adsorción del emulgente en la superficie límite aceite y agua, con lo que se dispersa un líquido en otro.
Bactericidas	Fenoles Compuestos de cloro Derivados del formaldehído	Prolongación de la vida útil de la emulsión. Eliminación de malos olores	Supresión o retardación del crecimiento de microorganismos.

### 3.10.3 Lubricantes sintéticos y especialidades

Debido a la predominancia de los aceites derivados del petróleo en la época moderna, es fácil olvidar que el hombre siempre ha utilizado diversos productos naturales para satisfacer sus necesidades de lubricación., en el campo industrial, los lubricantes denominados sintéticos han sido una alternativa que presenta un crecimiento constante en los usuarios.

Los lubricantes sintéticos en el sentido más estricto, son productos químicos fabricados en plantas químicas mediante la reacción de componentes diversos para la obtener un producto de características de comportamiento definidas, al igual que en los lubricantes convencionales o derivados del petróleo, se fabrican a partir de la mezcla de un aceite base purificado y aditivos químicos.

Estos productos pueden presentar propiedades deseables e indeseables, por consiguiente es de suma importancia escoger el lubricante apropiado para cada aplicación (8, 22).

Los aceites sintéticos superan a los lubricantes convencionales de base mineral, en ciertas exigencias, las más marcadas son:

- Bajo punto de fluidez crítica
- Menor volatilidad ( menor evaporación )
- Favorable relación viscosidad - temperatura
- Alta estabilidad al envejecimiento
- Alto punto de inflamación.
- Alta estabilidad a la oxidación ( alta resistencia a la temperatura )
- Bajo contenido de cenizas.
- Bajos coeficientes de fricción

Propiedades no deseadas:

- Baja protección anticorrosiva
- Baja compatibilidad con otros materiales (sellos )
- Toxicidad
- Compresibilidad

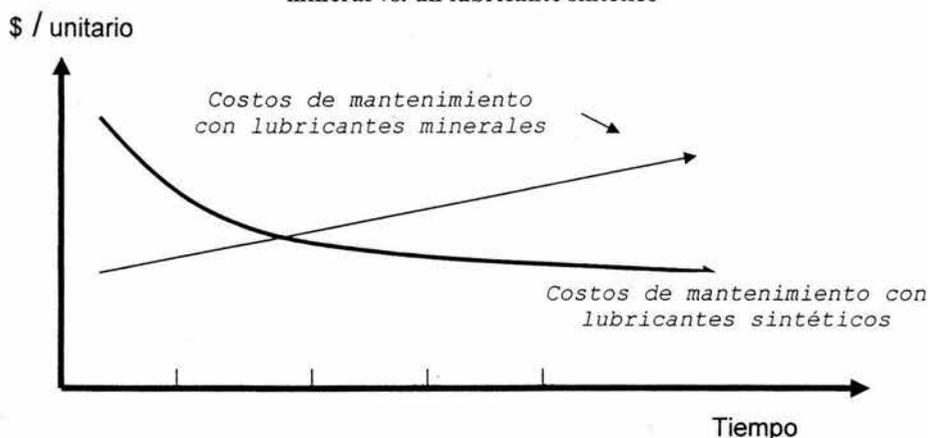
- Relación viscosidad - presión
- Susceptibles de contaminación.
- Disponibilidad
- Precio.

El mercado de los lubricantes sintéticos esta cubierto por los siguientes grupos genéricos de productos (8, 27):

1. Polialfaolefinas (PAOS) – Uso automotriz e industrial
2. Esteres de ácidos dibásicos – Aviación y automotriz
3. Poliesteres.- Aviación y Automotriz
4. Hidrocarburos sintéticos ( SHC) - Industrial
5. Poliglicoles - Industrial
6. Esteres fosfatados - Industrial
7. Silicones y otros - Industrial

Los lubricantes sintéticos son productos que cobran mayor importancia día a día, en el mercado industrial y automotriz, las regulaciones ecológicas en el mundo, los procesos y condiciones de servicio y eficiencia mecánica y de ahorro de energético, han provocado que los fabricantes originales de equipos y maquinaria, los especifiquen en sus manuales de mantenimiento.

**Grafica 3.10.3.- Comportamiento típico de los costos de mantenimiento de un lubricante mineral vs. un lubricante sintético**



En el cuadro (3.10.3), se muestra un comparativo cualitativo de las bondades de los lubricantes sintéticos. Estos productos, como se señaló anteriormente, pueden costar dos, tres o más veces su valor unitario cuando se comparan con un lubricante mineral de aplicación similar, sin embargo esta diferencia de precio, se ve justificada ampliamente por los beneficios en productividad cuando el producto se somete o se requieren:

- Alta temperatura ( 90°C hasta 300°C)
- Baja temperatura ( - 15 °C hasta 75°C)
- Condiciones de operación severas ( altas cargas y vibración excesiva)
- Larga vida de servicio
- Ambientes químicos agresivos
- Compatibilidad con procesos alimenticios.
- Requisitos de control ambiental

En la grafica 3.10.3 podemos observar el comportamiento típico de los costos de mantenimiento asociados con la aplicación de un lubricante sintético en una máquina, al principio existe una diferencia significativa entre el precio unitario de ambos, sin embargo, a medida que pasa el tiempo, las propiedades del lubricante sintético como lo es su mayor resistencia a la oxidación, implica menos cambios y volúmenes a utilizar, menos desecho de producto, menos limpieza y menos paros del equipo para realizar las labores de lubricación. Cuando se hace un análisis financiero de estas operaciones, el lubricante sintético resulta ser mas rentable comparado con los gastos generados por uso de un lubricante mineral en la mayoría de los casos.

#### **3.10.4 Lubricantes sintéticos y su aplicación.**

Entre los lubricantes sintéticos más comunes por aplicación destacan :

##### *Lubricantes Industriales*

- Aceites de circulación: Poliglicoles, SHF y Esteres orgánicos
- Lubricación de engranajes: Poliglicoles, SHF
- Líquidos hidráulicos resistentes al fuego: Esteres fosfatados y Poliglicoles
- Compresores: Poliglicoles, SHF y Esteres orgánicos
- Turbinas de Gas: SHF y Esteres orgánicos
- Grasas: SHF

##### *Lubricantes sintéticos de uso automotrices*

- Lubricación de motores ( Cárter ): SHF y Esteres orgánicos
- Lubricación de transmisiones: SHF
- Fluidos para frenos: Poliglicoles

##### *Lubricantes para aviación*

- Turbinas de Gas: Esteres orgánicos
- Sistemas hidráulicos: Esteres fosfatados, silicones y SHF
- Grasas: silicones, SHF y ésteres orgánicos.
- Pastas de ensamble en uniones roscadas y bujes.

Como se señaló, la decisión de la selección de aplicación de un lubricante sintético se debe de tomar realizando un análisis costo beneficio en su aplicación, hay que recordar que un

lubricante es una inversión, el análisis costo-beneficio deberá de incluir la siguiente información: (8)

- ◆ Recomendación y experiencia del fabricante
- ◆ Experiencias en equipos similares.
- ◆ Compatibilidad con sellos en el equipo.
- ◆ Tiempo de vida útil estimada
- ◆ Estudio de reducción de energía en el equipo.
- ◆ Bondades ambientales.
- ◆ Precio unitario y Global.
- ◆ Costos asociados a la aplicación del aceite mineral.

En México las aplicaciones de los lubricantes sintéticos aún son limitadas, debido al desconocimiento técnico de sus beneficios, sin embargo el panorama del desarrollo en este sector es muy halagador, ya que los requisitos técnicos y tecnologías de clase mundial, se han incrementado en los últimos años. (21,22).

**Cuadro 3.10.3 - Propiedades de los lubricantes sintéticos**

	Indice de viscosidad	Estabilidad a alta temperatura	Lubricidad	Propiedades a baja temperatura	Estabilidad hidrolítica	Resistencia al fuego	Volatilidad
Polialfaolefinas ( PAO) SHF	Buena	Buena	Buena	Buenas	Excelente	Mala	Buena
Diésteres	Varía	Excelente	Buena	Excelente	Regular	Regular	Promedio
Poliésteres	Bueno	Excelente	Buena	Buena	Buena	Mala	Promedio
Alquilbencenos SHF	Malo	Regular	Buena	Buena	Excelente	Mala	Promedio
Polialquilen glicoles	Excelente	Buena	Buena	Buena	Buena	Mala	Buena
Esteres fosfáticos	Malos	Excelente	Buena	Varía	Regular	Excelente	Promedio
Siliconas	Excelente	Excelente	Mala	Excelente	Regular	-----	Buena
Lubricantes fluorados	Excelente	Excelente	Varía	Regulares	Excelente	Excelente	Promedio

### 3.10.5 Lubricación óptima.

En el campo automotriz e industrial, la óptima lubricación implica un correcto método de lubricación. La ingeniería de lubricación (26, 7) cubre los procesos involucrados en la realización y práctica de una adecuada lubricación, lo anterior significa que el lubricante debe ser aplicado de manera cuidadosa y correcta sobre el punto de fricción, esta secuencia implica:

- Selección del lubricante adecuado.
- Aplicación del lubricante adecuado.
- En el tiempo adecuado.
- En la cantidad necesaria.
- En el punto adecuado.
- Con el personal adecuado.

Una gran mayoría de los problemas de lubricación en la práctica industrial, reside en el desconocimiento técnico, practicas erróneas en la aplicación y mala selección del lubricante en la maquinaria.

Estos objetivos en lubricación están relacionados directamente con el método, maquinaria y equipos de lubricación, tanto estacionarios como portátiles, existen libros y manuales para seleccionar el método de aplicación de un lubricante, el cual esta basado primordialmente en el intervalo de lubricación y el número de puntos a lubricar (2).

Los estudios en ingeniería de lubricación, señalan como muy importantes el criterio técnico que en la práctica, clasifica la lubricación, en tres procesos fundamentales

- Lubricación inicial
- Nueva lubricación
- Relubricación

La primera corresponde a la maquinaria en su momento de arranque “ como nueva” y permite controlar y evitar la fricción en puntos críticos o en daños ocasionales en el ensamble y transportación de la maquinaria, este caso particular requiere de la aplicación adecuada tanto del lubricante como de la cantidad suficiente, en el segundo caso, este cubre el tipo de lubricación después de que la maquinaria ya ha arrancado ó cuando la maquinaria ha sido reparada y permite seleccionar el tipo o sistema de lubricación dependiendo de las condiciones de operación del sistema ( lubricación de “por vida” ó intermitente ).

Una practica común al realizar la lubricación inicial de un equipo, consiste en llenar los depósitos hasta su máxima capacidad, considerando que una cantidad mayor de lubricante en el equipo o parte, significa una mayor seguridad de que este quede lubricado, sin embargo esto resulta un error en particular en equipo sujetos a velocidades altas como rodamientos en ventiladores o motores, la situación que se presenta es que el equipo necesita un espacio “libre” para girar y expulsar lubricante en exceso, al no existir este espacio, puede presentarse el fenómeno de fricción fluida en exceso, provocando el calentamiento y deterioro del lubricante y finalmente acortando la confiabilidad del equipo.

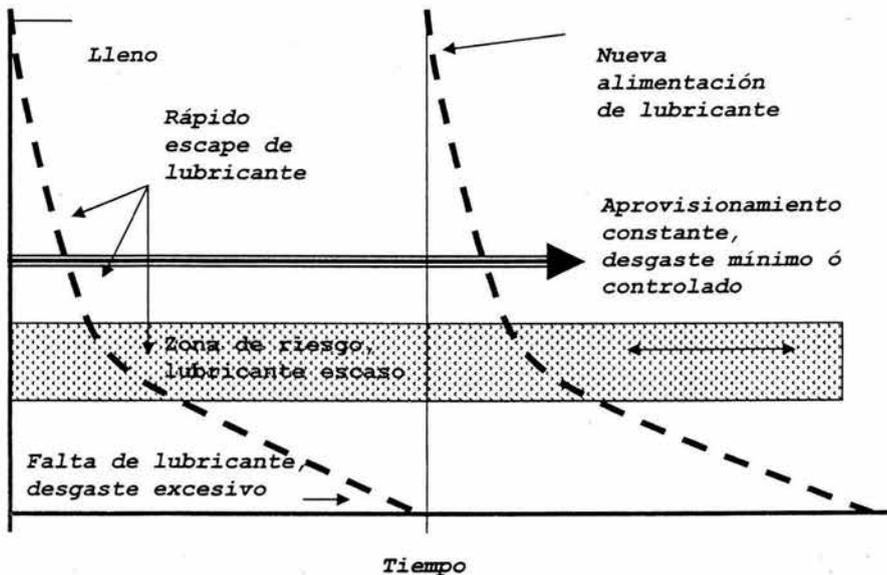
El proceso de relubricación o la determinación de cuando se debe de relubricar o cambiar un lubricante, se fundamenta en el análisis de laboratorio del mismo y no por tiempo o periodos.

Deben de seguirse perfectamente las instrucciones del fabricante, en particular en la aplicación de grasas, para mantener los niveles de llenado adecuados al diseño del equipo y evitar el fenómeno anterior provocado por una "sobrelubricación"(5, 4).

Existen equipos rotativos industriales de gran tamaño, por ejemplo, en la industria del papel o siderurgia, donde por diseño, pueden existir 50 o más puntos de lubricación, que requieren realizar labores de "relubricación" diaria o constante, esta labor operativa puede complicarse, quedando en ocasiones, por falta de tiempo o descuido, puntos sin lubricar o relubricar adecuadamente. En estos casos se hace necesario automatizar el proceso de lubricación por medio de sistemas centralizados de bombeo de aceite o grasa, para evitar un descuido en partes críticas de un equipo. La automatización permite que el equipo y parte lubricada se mantenga en una zona de seguridad adecuada, manteniendo siempre una cantidad uniforme y constante en sus partes, evitando llegar a zonas de riesgo de desgaste con controlado, por escasa cantidad de película lubricante en el punto de contacto. Los sistemas centralizados de lubricación se calculan estimando el riesgo-costo, tiempo y el número de puntos a lubricar y permiten optimizar las cantidades de lubricante a aplicar, en comparación con operaciones no automatizadas o manuales.(figura 3.10.5)

**Fig 3.10.5 – Alimentación automatizada de lubricante vs. lubricación manual**

*Película lubricante en el punto de contacto*



La relubricación implica un sistema que ya ha sido lubricado inicialmente y es una condición primordialmente operacional, esta lubricación y sus periodos de aplicación, dependen del tiempo y temperatura, así como del tipo de carga, velocidad y medio circundante, los fabricantes de los equipos recomiendan en sus manuales, los periodos óptimos de relubricación., sin embargo las nuevas estrategia de confiabilidad, basan los periodos en programas de análisis y monitoreo de aceites y maquinaria, que resultan más rentables y económicos, que los tradicionales basados en periodos establecidos.

Tanto la calidad del lubricante como su cantidad, inciden directamente en el rendimiento, productividad y recuperación de la inversión en la maquinaria.

La ingeniería de lubricación es por lo tanto una actividad integral dentro del campo de la lubricación, que debe de tomarse en cuenta en la práctica de la lubricación industrial y automotriz (1).

#### **4) Clasificación de lubricantes industriales y automotrices**

##### **4.1 Tipos de lubricantes en el Mercado**

Dado que la cantidad y tipo de lubricantes presentes en el mercado mundial es sumamente amplia, se puede clasificar a los lubricantes por su sector genérico de aplicación, en este sentido se pueden clasificar en dos grandes grupos:

- Lubricantes para la industria del transporte: Automotrices, Ferroviarios, Aviación, Navegación, Espaciales.
- Lubricantes para maquinas industriales.

Para la aplicación de un lubricante, se requiere entonces cumplir con las especificaciones y recomendaciones del fabricante del equipo, cuando esto no es posible por cualquier causa, se requiere de la asesoría de un experto en tribología y lubricación, ya que una inadecuada selección o aplicación de un lubricantes( no obstante que sea de alta calidad), puede ser perjudicial o hasta catastrófica para el mecanismo o equipo que se trate, lo que financieramente, siempre va a ser más costoso, que el costo unitario del lubricante.

Dentro de los grupos señalados, los siguientes son los lubricantes más comúnmente utilizados:

Lubricantes de tipo automotriz:

- ◆ Aceites de motor gasolina y diesel
- ◆ Aceites de transmisión automática y estándar.
- ◆ Aceites para diferenciales
- ◆ Aceites para locomotoras
- ◆ Aceites para barcos
- ◆ Aceites para aviación
- ◆ Aceites hidráulicos
- ◆ Aceites para motores fuera de borda

Aceites lubricantes industriales:

- ◆ Aceites hidráulicos
- ◆ Aceites para engranes y reductores
- ◆ Aceites para compresores
- ◆ Aceites de corte y maquinado de metales
- ◆ Aceites para turbinas
- ◆ Aceites de transferencia de calor
- ◆ Aceites para transformadores
- ◆ Aceites para herramienta neumática
- ◆ Aceites para husos
- ◆ Aceites textiles
- ◆ Aceites para refrigeración
- ◆ Aceites para baja temperatura
- ◆ Aceites para calandras
- ◆ Aceites para templado
- ◆ Aceites para motores eléctricos
- ◆ Aceites solubles
- ◆ Aceites biodegradables

Como podemos notar, existen una gran gama de productos, que a su vez incluyen diversas propiedades y características de funcionamiento, de ahí la importancia de conocer y seleccionar el producto adecuado para cada aplicación (5, 15).

#### **4.2 Organismos internacionales que regulan la calidad de los lubricantes**

Las normas, clasificaciones, especificaciones, internacionalmente reconocidas, que regulan todo lo concerniente a los diferentes niveles de calidad de los lubricantes y sus campos específicos de aplicación, permiten un lenguaje común entre los fabricantes y constructores de maquinaria y equipos, productores de lubricantes y aditivos, Existen organismos internacionales que norman, regulan y caracterizan a los aceites lubricantes en el mundo, los principales son:

- SAE ( Sociedad Americana de Ingenieros Automotrices )
- API ( Instituto Americano del Petróleo )
- ASTM ( Sociedad Americana para pruebas en materiales )
- ISO ( Organización Internacional de Estándares )
- DIN ( Sociedad Alemana de Estándares )
- AGMA ( Sociedad Americana de Fabricantes de Engranes )
- NLGI ( Instituto Americano de Grasas lubricantes )
- AAMA ( Asociación Americana de Fabricantes de Automóviles )
- EAMA ( Asociación Europea de Fabricantes de Automóviles )
- CCMC ( Comité de constructores de vehículos del mercado común europeo )
- JAMA ( Organización japonesa de Fabricantes de Automóviles )
- CMA ( Organización de Fabricantes Americanos de Productos Químicos )
- ILSAC ( Comité Internacional de Estándares y Aprobaciones de lubricantes )

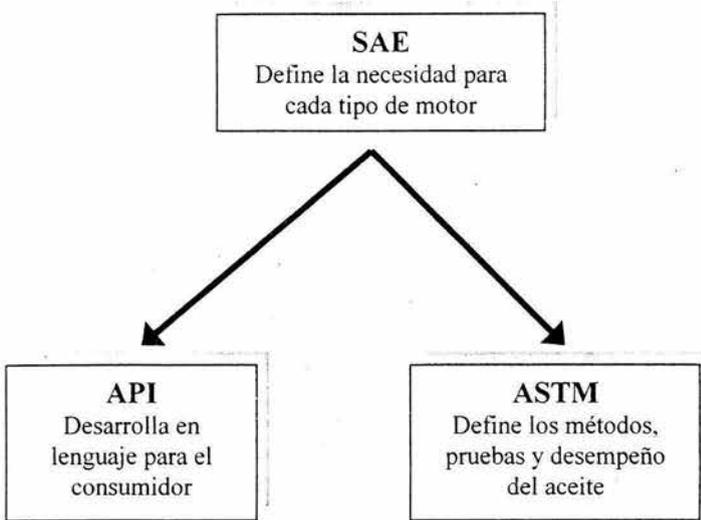
Estas organizaciones tienen como objetivo el normar, clasificar, establecer calidades de producto, servicio y operación, pruebas de campo y de laboratorio, etc., también establecen guías a los usuarios para la selección adecuada de los lubricantes. El cuadro 4.2 nos indica en forma general la información proporcionada por los organismos señalados (27):

**Cuadro 4.2a Organismos internacionales que norman, regulan y caracterizan a los aceites lubricantes en el mundo**

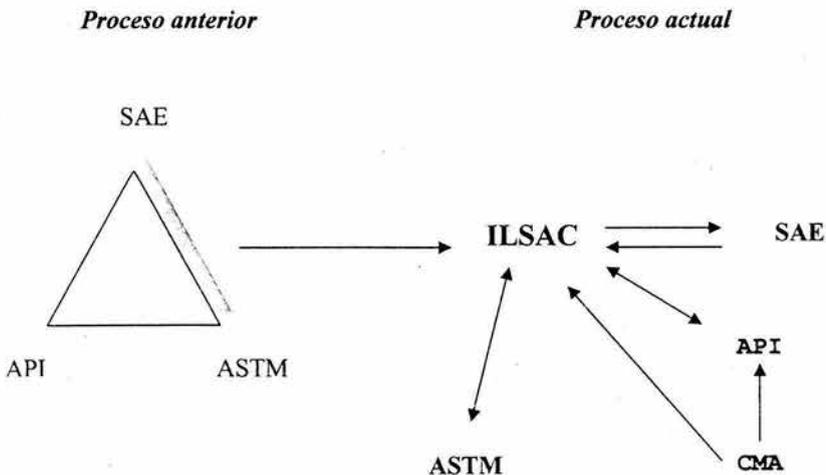
Organización	Clasifica Viscosidad	Determina calidad y servicio	Determina pruebas de laboratorio y de campo
SAE	*		
API		*	
ASTM		*	*
ISO	*		
DIN		*	*
AGMA	*		
NLGI			*
AAMA		*	*
EAMA		*	*
JAMA		*	*
CCMC		*	
CMA		*	*

En la actualidad la ILSAC, Comité Internacional de Estándares y Aprobaciones de lubricantes, y la CMA (Asociación de fabricantes de productos químicos), coordinan y norman los estándares de desempeño de los lubricantes automotrices. ( ver esquema 4.2c)

#### 4.2 b Relación entre SAE, API y ASTM



#### 4.2 c Relación entre la ILSAC y otros organismos internacionales de prestigio.



Estos organismos, permiten estandarizar con mayor precisión y confiabilidad la calidad bajo estándares internacionales, los lubricantes para vehículos que utilizan aceites de motor.

#### **4.3 Aspectos importantes a considerar en el desarrollo y comercialización de un aceite lubricante.**

Para el desarrollo y comercialización de un nuevo lubricante, se requiere ejecutar, parcial o totalmente el siguiente proceso (13, 14):

- Estudio de mercado.
- Evaluaciones a escala de laboratorio fisicoquímico.
- Evaluación de las tecnologías de producción.
- Evaluaciones a escala de mecanismos de imitación ( Ensayos en equipos de prueba pilotos)
- Evaluaciones de equipos reales en bancos de ensayo.
- Evaluaciones de campo en mecanismos y equipos en condiciones reales de explotación.
- Certificación de calidad y campo de aplicación, de acuerdo a normas y especificaciones internacionalmente aceptadas y reconocidas.
- Programa de control de calidad y monitoreo de los lubricantes en servicio.

Este proceso puede ser de moderada complejidad para cierto tipo de lubricantes industriales como en el caso de aceites para turbinas, sistemas hidráulicos y compresores y de alta complejidad para los aceites de combustión interna, transmisiones automáticas y transmisiones mecánicas automotrices.

Un lubricante amparado por un certificado de calidad internacionalmente reconocido, implica que el mismo cumple con todos los requisitos para el que está destinado. Los fabricantes de maquinarias y equipos incluyen los lubricantes en el proceso de diseño, teniendo en cuenta elementos que aportan los fabricantes de aditivos y lubricantes. Es por ello que para la aplicación de los lubricantes se requiere cumplir las recomendaciones de los fabricantes de equipos, cuando esto no es posible, se deben de solicitar los servicios de un experto en tribología, ya que una inadecuada selección y aplicación de un lubricante (aunque se considere de alta calidad), puede resultar perjudicial y hasta catastrófica para el mecanismo o equipo de que se trate, lo que resulta siempre mucho mas costoso que el propio lubricante.

#### **4.4 Lubricantes automotrices**

Los lubricantes de tipo automotriz, describen una serie de productos, cuyo campo de aplicación, comprende las máquinas de “combustión interna”. La combustión interna incluye sistemas mecánicos donde el objetivo primordial es el de desarrollar poder, transformando la energía proveniente de un fenómeno de combustión. Esta clase de sistemas incluye máquinas de pistones recíprocantes usadas en múltiples aplicaciones, desde el automóvil hasta grandes turbinas de gas.

En los lubricantes de tipo automotriz, la selección de la viscosidad adecuada es de extrema importancia, ya que influye directamente en la velocidad del desgaste, sellado, economía del

combustible, potencia y formación de depósitos. Para algunas máquinas en particular, la viscosidad es fundamental en el arranque y velocidad de transmisión de potencia, demasiada viscosidad puede causar desgaste adhesivo, reducción de la potencia e incremento excesivo de combustible en el arranque

El nuestro caso nos enfocaremos a describir los fundamentos de selección de un aceite de tipo automotriz, que en la actualidad comprende un poco más del 50% del consumo mundial de lubricantes. (27).

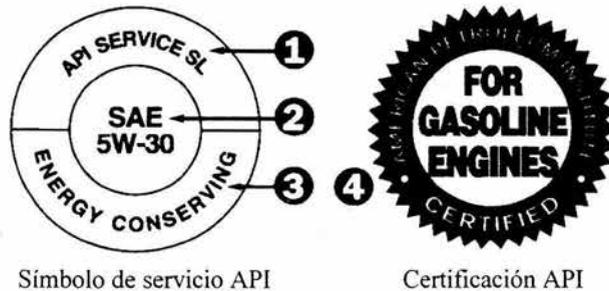
Todos los fabricantes de productos lubricantes, vehículos y de maquinaria industrial, señalan a los usuarios finales en sus manuales de servicio y mantenimiento, las especificaciones y clasificaciones de viscosidad, calidades y requerimientos básicos para su maquinaria o motor, permitiendo a los usuarios facilitar la selección del aceite a utilizar, los puntos más importantes a considerar por los usuarios son :

- Selección de la viscosidad (según la clasificación SAE)
- Selección del tipo de servicio (API)
- Pruebas de campo que deben de cumplir los productos

Los fabricantes de lubricantes también siguen éstas guías de selección en su fabricación regulando sus calidades de acuerdo a las normas, pruebas de campo y de laboratorio.

Existen fundamentalmente los siguientes tipos de aceites automotrices:

- ◆ Aceites de motor a gasolina y diesel
- ◆ Aceites para diferenciales y transmisiones
- ◆ Aceites para dirección hidráulicos



Símbolo de servicio API

Certificación API

Fig 4.4 (1) Categoría de servicio de lubricante: Gasolina "S" o Diesel "C" (2) Viscosidad (3) Nivel de economía y ahorro de combustible (4) Certificación de calidad API de cumplimiento de pruebas y estándares.

Cada uno de los anteriores productos tiene una metodología sencilla para su adecuada selección. El Instituto Americano del Petróleo API, establece un símbolo sencillo ( fig 4.4) que indica una certificación para distinguir un lubricante de calidad para motores de gasolina y diesel. Los aceites que en sus envases uno o ambos distintivos, han cumplido con los

requisitos de desempeño establecidos por los fabricantes de vehículos internacionales, así como también los de la industria de lubricantes., más de 500 empresas en el mundo cuentan con este distintivo.

#### 4.5 Clasificación SAE para aceites de motor

La organización de la SAE (Society of Automotive Engineers), clasifica los aceites para motores y engranajes teniendo en cuenta únicamente su viscosidad y no considera en ello su calidad.

La SAE asigna números y letras, que corresponden a la medida de viscosidad cinemática en centistokes, entre los cuales puede quedar comprendido un lubricante dado, por ejemplo 0W, 5W, 10W, 20, 30 ,40 etc., ( en la tabla 4.51, se muestra esta clasificación).

**Tabla 4.51 - Grado de Viscosidad para aceites de motor-SAEJ-300 ( Marzo 1993)**

Grado de viscosidad SAE	Viscosidad (1) CP a temperatura °C – Máx.	Temperatura (2) °C límite de bombeo – Máx	Viscosidad (3) (cSt) a 100 °C	
			Min	Máx
0W	3.250 a – 30	-35	3.8	-
5W	3.500 a – 25	-30	3.8	-
10W	3.500 a – 20	-25	4.1	-
15W	5.400 a – 10	-20	5.6	-
20W	6.000 a – 5	-15	5.6	-
25W	8.000 a – 5	-10	9.3	-
20	-	-	5.6	< 9.3
30	-	-	9.3	< 12.5
40	-	-	12.5	< 16.3
50	-	-	16.3	<21.9
60	-	-	21.9	< 26.1

Nota: 1cP = 1 m Pa/s; 1 cSt = 1 mm<sup>2</sup> / seg

(1) ASTM D-2662 ( Simulador de baja temperatura en el cigüeñal)

(2) ASTM D-4684 para SAE 5W, 10W y 15W

(2) ASTM D-3829 para SAE 0W, 20W y 25W ( Viscosímetro minirotativo)

(3) ASTM D-445 (Viscosidad cinemática)

Como se observa en la tabla, se parte del número 0 para aceites de motor delgados hasta el número 60 para el aceite más grueso. Hasta hace unos 40 años, estaba generalizado el uso de este tipo de lubricantes de motor denominados “monogrados”, los cuales estaban indicados con un número, el cual se refería a una medida de la viscosidad a 40 y 100 °C. Con el desarrollo de mejor tecnología en motores y nuevos productos, surgen los denominados lubricantes “multigrados”, cuya característica primordial, es la de presentar una menor resistencia al cambio de la viscosidad por la temperatura ( mejor IV), generalmente tienen la propiedad de efectuar un sólo cambio de viscosidad, el cual correspondería al dos cambios en los aceites “monogrados”.

Es importante señalar que los requisitos de calidad y viscosidad, pueden variar en cada tipo de vehículo. Es recomendable siempre utilizar lubricantes con el sello de calidad API descrito en 4.4., siempre que se adquiera un aceite de motor en el mercado.

#### 4.6 Clasificación de servicio API para aceites de motor de gasolina y diesel

Esta clasificación, es una guía para designar el tipo de servicio del aceite de motor (tabla 4.5), la letra “S” se utiliza para los productos utilizados en motores de gasolina y la letra “C” para las aplicaciones en motores a diesel ( tabla 4.3.2)., por ejemplo un lubricante clasificado como “SJ”, es un aceite recomendado para motores de gasolina de modelos 1998 o anteriores, un lubricante clase “CG4” es un aceite para motor diesel de cuatro tiempos que operan con combustible bajo en Azufre y cumplen los reglamentos de emisión de la EPA. Cabe señalar que todos los fabricantes de vehículos automotores en el mundo, indican claramente en sus manuales de servicio, la clasificación de viscosidad y servicio requerida para su motor.

En la actualidad la ILSAC, Comité Internacional de Estándares y Aprobaciones de lubricantes, establece desde 1994, el comportamiento estándar de un aceite de motor de gasolina para autos de pasajeros. También establece una marca en los envases y cajas de los aceites autorizados, para que el consumidor distinga en el mercado que producto cumple con los requisitos establecido por el fabricante.

**Tabla 4.6.a Clasificación API para aceites de motor de gasolina y diesel**

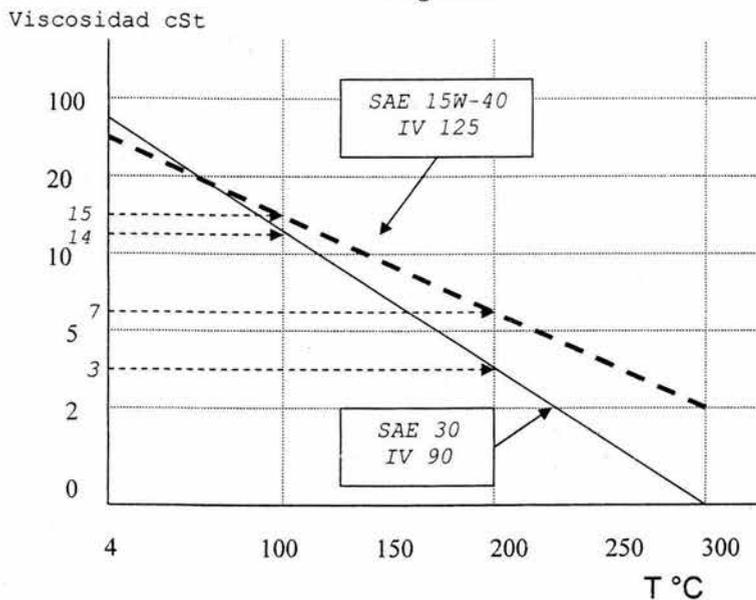
<b>GASOLINA</b> <b>( Año-modelo de automotor)</b>	<b>DIESEL</b> <b>(Año – modelo de automotor)</b>
<b>SA ( 1920) – OBSOLETO</b>	<b>CA (1940) –OBSOLETO</b>
<b>SB ( 1930) – OBSOLETO</b>	<b>CB (1949) – OBSOLETO</b>
<b>SC (1967) – OBSOLETO</b>	<b>CC (1961) –OBSOLETO</b>
<b>SD (1971) – OBSOLETO</b>	<b>CD ( 1955) – OBSOLETO</b>
<b>SE (1979) – OBSOLETO</b>	<b>CE ( 1987) – OBSOLETO</b>
<b>SF (1988) –OBSOLETO</b>	<b>CD-2 (1987) – OBSOLETO</b>
<b>SG (1993) – OBSOLETO</b>	<b>CF, CF-2 (1994) – VIGENTE</b>
<b>SH / GF-1 (1996) – OBSOLETO</b>	<b>CF-4 ( 1990) – VIGENTE</b>
<b>SJ / GF 2 (2001) – VIGENTE</b>	<b>CG-4 (1995) – VIGENTE</b>
<b>SL ( 2001 ) - VIGENTE</b>	<b>CH-4 (1998) – VIGENTE</b>

Todos los fabricantes de lubricantes en el mundo tienen la obligación (en ocasiones por ley) de mostrar en las tapas o etiquetas de todos sus productos, su clasificación de viscosidad y servicio SAE, API, así como el de mostrar los certificados de calidad que avalen dichos requisitos (26).

#### 4.7 Aceites monogrados y multigrados

Los aceites de motor se subdividen en aceites “monogrados” y “multigrados”. Los primeros se caracterizan porque sólo tienen un grado de viscosidad y su funcionamiento está limitado a cierta temperatura mínima de bombeo antes de su congelación. Existen aceites monogrados con la letra “W”, la cual se deriva de la palabra inglesa “winter” que significa invierno o frío, y sirven para designar aquellos lubricantes y sus viscosidades en condiciones de bajas temperaturas, hasta  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Lo que esto indica es que estos lubricantes, cuando están sometidos a bajas temperaturas, no incrementan su viscosidad, sino que permanecen delgados, garantizando de esta manera, la correcta lubricación del motor. Siempre hay que considerar dos condiciones de estos lubricantes en tiempo frío. La primera es la capacidad del aceite para permitir que el cigüeñal del motor gire lo suficientemente rápido para el arranque, la segunda es que el aceite, una vez que el motor se ha puesto en marcha y se ha calentado, brinde la protección adecuada en caliente, cabe señalar que en estas condiciones, las temperaturas ambientales externas afectan muy poco las temperaturas internas (1).

**Gráfica 4.71 - Variación de la viscosidad con la temperatura en aceites “multigrados” y “monogrados”**



Los aceites “multigrados” poseen un alto índice de viscosidad IV, lo cual permite que el aceite pueda utilizarse para cubrir varios grados SAE de viscosidad, así un aceite 20W-40, significa que a bajas temperaturas (- 15°C), se comporta como un aceite delgado SAE 20W, y en alta temperatura como un aceite grueso SAE 40.

En la gráfica 4.71, (gráfica de viscosidad temperatura para aceites automotrices), se puede apreciar la variación de la viscosidad de un aceite “monogrado” SAE 30, con respecto a un “multigrado” SAE 15W-40, para un mismo intervalo de temperatura de 100 °C, esto es:

SAE 30 .....Variación ( 11 cSt )  
 SAE 15W-40 ..... Variación ( 8 cSt )

Variación SAE 30 > variación SAE 15W-40

Lo anterior indica que el aceite “multigrado” es más estable que el “monogrado”, no obstante lo anterior, en alta temperatura, algunos aditivos mejoradores del IV, tienden a descomponerse y carbonizarse, generando depósitos indeseables en el motor, los aceites formulados de alta calidad modernos, permiten utilizarlos con mayor confiabilidad.

Los aceites “multigrados”, son más caros por unidad cuando se comparan con un aceite “monogrado” de igual número SAE, pero esta diferencia se paga con el retorno de la inversión de equipo al controlar el desgaste en mejor medida que los “monogrados”.

Para que un aceite se clasifique por ejemplo como SAE 40, deberá presentar una viscosidad promedio entre 150 cst a 40 °C y 15 cst a 100 °C., esta clasificación es aceptada internacionalmente para designar la viscosidad de un aceite de motor.

#### 4.8 Clasificación SAE para aceites de transmisión automotriz.

Para los aceites de transmisión manual y automática, se sigue la clasificación SAE J306 Mar 85, para determinar la viscosidad ( ver tabla 4.8 ). Los números de clasificación de uso más común en climas templados son el SAE 90 y 140, ya que los restantes se utilizan en climas extremos.

**Tabla 4.8 - Grados de viscosidad para aceites de transmisiones mecánicas. SAE J-306 (Octubre 1991)**

Número de viscosidad SAE	Máxima temperatura °C Para viscosidad de 150,000 cP (150 Pas)	Viscosidad (3) (cSt) a 100 °C	
		Mín	Máx
70W	-55	4.1	-
75W	-40	4.1	-
80W	-26	7.0	-
85W	-12	11.0	-
90	-	13.5	< 24
140	-	24.0	< 41
250	-	41.0	-

#### 4.9 Clasificación de servicio API para aceites de transmisión automotriz.

La API ha establecido una escala de seis tipos de servicios para definir la calidad de los aceites de engranajes automotrices. Como hemos notado en las clasificaciones mostradas en las tablas, cada número supera o satisface un servicio más severo que su anterior (27).

**Tabla 4.9 Clasificación API para aceites de engranajes automotrices.**

Clasificación	Tipo de servicio
API GL -1	Para engranajes helicoidales cónicos y sin fin, con carga moderada y ciertas transmisiones manuales. Los aceites minerales puros cumplen satisfactoriamente, pueden contener inhibidores de corrosión, antiespumantes y depresores del punto de congelación. No contienen aditivos EP ni modificadores de fricción.
API GL -2	Para servicio automotriz en engranajes sin fin que operan con cargas, temperaturas y velocidades de deslizamiento tales, que los GL-1 no las satisfacen.
API GL -3	Para engranajes helicoidales cónicos y transmisiones manuales con cargas y velocidades moderadamente severas, donde los GL-2 no satisfacen adecuadamente el rendimiento.
API GL -4	Este servicio es característico de engranes hipoidales operados en condiciones de alta velocidad-bajo torque y baja velocidad- alto torque.
API GL -5	Este servicio es característico de engranes hipoidales operados en condiciones de alta velocidad-bajo torque, en engranajes industriales y automotrices
API GL -6	Este servicio es característico de engranes automotrices hipoidales con ejes alabeados a gran distancia, operados bajo condiciones de alta velocidad y rendimiento. , en engranajes industriales.

#### 4.10 Propiedades de los lubricantes automotrices

A continuación se presentan las propiedades y comportamiento generales de los lubricantes más comunes de tipo automotriz:

##### a) Grupo de lubricantes automotrices

Motores diesel/gasolina, cárter - cilindros

- Viscosidad adecuada
- Buen comportamiento a baja temperatura
- No formación de lodos
- Detergencia y dispersión en distintos grados
- Estabilidad a la oxidación
- Prevención contra la herrumbre
- Propiedades antidesgaste
- Propiedades antiespumantes
- No corrosivo (Para aleación de cojinetes)

Engranajes hipoidales

- Altas propiedades EP
- Estabilidad a la oxidación a alta temperatura
- No corrosivo
- Propiedades antiherrumbrantes
- Bajo punto mínimo de fluidez.
- Buenas propiedades antiespumantes.

Transmisiones automáticas

- Baja viscosidad
- Elevado índice de viscosidad
- Bajo punto mínimo de fluidez
- Propiedades antiespumantes
- Propiedades antiherrumbrantes
- No corrosivo
- Efecto mínimo sobre cierres y sellos
- Propiedades antidesgaste y EP
- Buena estabilidad a la oxidación a altas temperaturas

Grandes motores diesel tipo cruceta

- Viscosidad adecuada
- Buena estabilidad a la oxidación
- Baja volatilidad
- Alto TBN
- Buenas propiedades antidesgaste
- Baja formación de depósitos para mantener limpias las lumbreras

## Cárter y refrigeración de pistón

- Viscosidad adecuada, normalmente SAE 30
- Buena estabilidad a la oxidación
- Propiedades anticorrosivas
- Buena demulsibilidad

### 4.11 Lubricantes industriales

Al igual que en el caso anterior, en los lubricantes industriales, es de suma importancia la adecuada selección de los siguientes elementos:

- Viscosidad (según la clasificación ISO y AGMA)
- Tipo de aditivos (según manual de fabricante)
- Pruebas de campo y laboratorio que deben de cumplir los productos

Se recomienda para la selección adecuada de un lubricante industrial, leer cuidadosamente el manual del mantenimiento en servicio de la maquinaria industrial para identificar el aceite lubricante y sus características.

Para la selección de la viscosidad correcta, la ISO y la AGMA, han establecido un sistema basado en números para clasificar los grados de viscosidad en centistokes a 40 y 100 °C, no obstante desde la introducción del sistema ISO en la industria en los años 80's, los ingenieros de campo y mantenimiento se han enfrentado a un problema para determinar la viscosidad adecuada, debido a la costumbre de muchos usuarios y fabricantes de maquinaria de clasificar sus viscosidades de servicio con estándares ya obsoletos o antiguos como:

- ◆ Viscosidad SSU ( Segundos Saybolt Universal)
- ◆ Viscosidad Redwood No.1 (segundos)
- ◆ Engler (grados)
- ◆ Saybolt Furol (segundos)
- ◆ Viscosidad Redwood No.2 (segundos)

Siendo la viscosidad el factor más importante a especificar en un lubricante industrial, la dificultad surge al tratar de convertir datos especificados bajo las medidas anteriores a la nueva clasificación ISO ó AGMA. En muchos casos también se especifican medidas bajo especificaciones SAE como industriales y el problema se complica aún más, sobre todo si no se tiene información técnica sobre el particular.

Cuando el ingeniero de campo se enfrenta al problema de una máquina que requiere por ejemplo un aceite hidráulico con viscosidad clasificación Saybolt, Engler, Redwood ó SAE, puede convertir estas clasificaciones a las normas ISO Internacionales utilizando factores de conversión o por medio de las tablas como la descrita en el inciso 4.14.

A continuación se señalan los tipos de lubricantes industriales más comunes y algunas de sus propiedades y características generales más importantes (7,8):

## Grupo de lubricantes industriales

### a) Máquinas herramientas

#### Lubricación centralizada

- Viscosidad adecuada en función del equipo
- Estabilidad a la oxidación
- No corrosivo
- Propiedades antiespumantes
- Propiedades antiherrumbrantes

### b) Lubricación manual o a "toda pérdida"

- Viscosidad adecuada en función del equipo

### c) Guías y bancadas

- Viscosidad adecuada según verticales y horizontales
- Buenas propiedades EP
- Buenas propiedades de adherencia y untuosidad

### d) Reductores, engranajes industriales

- Viscosidad adecuada en función de la temperatura ambiente.
- Estabilidad a la oxidación
- Buenas propiedades EP
- No corrosivo al bronce en engranajes corona - sin fin
- Buenas propiedades de separación del agua
- Buen comportamiento del aditivo EP a la centrifugación

### e) Cojinetes antifricción, bolas y rodillos

- Viscosidad adecuada según dimensión, velocidad, carga y temperatura
- Estabilidad a la oxidación
- Baja tendencia a la formación de depósitos
- Bajo punto mínimo de fluidez
- Buenas propiedades de separación del agua ( Trenes de laminación )
- Propiedades antiherrumbrantes

### f) Cojinetes Lisos

- Viscosidad adecuada según dimensión, velocidad, carga y temperatura
- Estabilidad a la oxidación a altas temperaturas
- No corrosivo
- Buenas propiedades de separación del agua ( Trenes de laminación )
- Propiedades antiherrumbrantes
- Buenas propiedades antiespumantes
- En algunos casos propiedades EP

g) Sistemas hidráulicos

- Viscosidad adecuada para asegurar su fluidez en la transmisión de energía
- Alto índice de viscosidad
- Baja compresibilidad
- Estabilidad a la oxidación a alta temperatura
- Buenas propiedades de separación del agua
- Propiedades antiherrumbrantes
- Buenas propiedades de eliminación del aire
- Formación mínima de espuma
- Buen comportamiento con sellos y juntas cuando se requieran aditivos EP
- Posibilidad de filtración adecuada

h) Compresores

Alternativos

- Viscosidad adecuada en función del diámetro del cilindro y potencia
- Alta estabilidad a temperatura máxima del aire
- Baja tendencia a la formación de depósitos
- Mínima formación de espuma
- Propiedades antiherrumbrantes

Rotativos

- Alta viscosidad para asegurar el cierre
- Gran estabilidad a altas temperaturas del aire
- Propiedades antiespumantes y antiherrumbrantes

i) Turbinas

- Baja viscosidad dadas sus elevadas RPM
- Estabilidad a la oxidación y formación de lodos
- Buenas propiedades antiespumantes
- Buenas propiedades de desaereación
- No corrosivo y antiherrumbrante
- Buenas propiedades de separación del agua ( Trenes de laminación )
- En ciertos casos ligeras características EP

j) Transformadores

- Baja viscosidad y punto mínimo de fluidez para asegurar una buena transferencia de calor
- Ausencia de humedad y sólidos en suspensión
- Alto poder dieléctrico
- Elevada estabilidad a la oxidación
- Bajas pérdidas dieléctricas

k) Cables y cadenas

- Buena penetrabilidad
- Buena Adhesividad
- Propiedades EP
- Baja Volatilidad en altas temperaturas
- Alta resistencia al agua
- Elevada estabilidad a la oxidación
- Baja formación de depósitos en altas temperaturas
- No corrosivo y con propiedades antiherumbre

#### 4.12 Clasificación ISO de viscosidad para aceites industriales.

La clasificación ISO para la selección de un lubricante industrial, se basa en la medición de la viscosidad de aceite en centistokes o mm<sup>2</sup>/seg (numéricamente iguales) a 40 y 100 °C, Los números que designan cada grado ISO representan el punto medio de un intervalo de viscosidad entre un 10% por debajo y 10% por encima de éstos valores. Ver tabla 4.12

En este sistema, por ejemplo, un lubricante con grado ISO 100, tiene una viscosidad cinemática a 40°C en el rango de 90 cSt a 110 cSt. Cabe señalar que esta medida de viscosidad, sólo indica esta propiedad pero no dice nada en cuanto a la calidad, aplicación, tipo de aditivos del producto. Sólo se aplica para aceites industriales en equipos y máquinas de transmisión de potencia mecánica, se excluyen por lo tanto, aceites de corte, temple ó dieléctricos (14).

Los rangos típicos de viscosidades ISO y sus aplicaciones generales son:

De ISO VG 2 a ISO VG 22 - Husillos de alta velocidad

De ISO VG 32 a ISO VG 100 - Turbinas y sistemas hidráulicos

De ISO VG 32 a ISO VG 150 - Compresores

De ISO VG 68 a ISO VG 150 - Reductores Pequeños

De ISO VG 220 a ISO VG 320 - Reductores Medianos

De ISO VG 460 a ISO VG 680 - Reductores Grandes y corona sinfin

De ISO VG 1000 a ISO VG 3000 - Aceites pesados y grandes transmisiones

#### 4.13 Clasificación AGMA

La clasificación de viscosidad AGMA, está basado en la norma ASTM D-2422, para lubricantes de engranajes industriales, y se establece con una codificación que va del número 1 al 8, la cual corresponde a un rango de viscosidades en SSU a 100 °F o en cSt a 37.8°C. El sufijo R en la tabla 4.13, indica los lubricantes con diluyente volátil y no inflamable. Sus rangos de viscosidad corresponden a productos sin disolventes., esta clasificación incluye aceites minerales, puros, aceites sintéticos, aceites con aditivos de extrema presión, aceites con compuestos grasos de origen animal y vegetal. Los aceites denominados "compound" o compuestos, se encuentran en esta clasificación para condiciones de trabajo donde están presentes cargas deslizantes o de impacto, como es el caso de reductores de tornillo sin fin, cónicos e hipoidales ( 10, 1)

**Tabla 4.12 Clasificación de viscosidades ISO(\*) para aceites lubricantes industriales**

STANDARD ISO 3448 Todas las viscosidades a 40°C, para diferentes temperaturas  
 ASTM D-2422 consulte tablas ASTM-341

Grado de Viscosidad	Punto medio de Viscosidad cSt	Viscosidad cinemática, cSt Mínimo	Viscosidad cinemática, cSt Máximo	Equivalencia aproximada en SSU
ISO VG 2	2.2	1.98	2.42	32
ISO VG 3	3.3	2.88	3.52	36
ISO VG 5	4.6	4.14	5.06	40
ISO VG 7	6.8	6.12	7.48	50
ISO VG 10	10	9.00	11	60
ISO VG 15	15	13.5	16.5	75
ISO VG 22	22	19.8	24.2	105
ISO VG 32	32	28.8	35.2	150
ISO VG 46	46	41.4	50.6	215
ISO VG 68	68	61.2	74.8	315
ISO VG 100	100	90	110	465
ISO VG 150	150	135	165	700
ISO VG 220	220	198	242	1000
ISO VG 320	320	288	352	1500
ISO VG 460	460	414	506	2150
ISO VG 680	680	612	748	3150
ISO VG 1000	1000	900	1100	4650
ISO VG 1500	1500	1350	1650	7000
ISO VG 3000	3000	2750	3250	

(\*) ISO = International Standards Organization

**Tabla 4.13 Clasificación AGMA(\*) para la lubricación de engranajes industriales**

Aceites de engranaje sin EP (con inhibidor de herrumbre y corrosión)	Gama de viscosidad cSt (mm <sup>2</sup> /seg) a 40°C	Grado ISO Equivalente	Lubricante con EP	Viscosidad SSU a 40°C
1	41.4 a 50.6	46		193 a 135
2	61.2 a 74.8	68	2 EP	284 a 347
3	90 a 110	100	3 EP	417 a 510
4	135 a 165	150	4 EP	626 a 765
5	198 a 242	220	5 EP	918 a 1122
6	288 a 352	320	6 EP	1335 a 1632
7 Compuesto	414 a 506	460	7 EP	1919 a 2346
8 Compuesto	612 a 748	680	8 EP	2837 a 3467
8ª Compuesto	900 a 1100	1000	8A EP	4171 a 5098

(\*) AGMA = American Gear Manufacturers Association

#### 4.14 Equivalencias en los sistemas de clasificación de viscosidad en lubricación.

En la práctica industrial, se presentan confusiones en la selección de la viscosidad adecuada para un equipo, ya que los fabricantes de maquinaria incluyen en sus manuales diversos tipos de unidades, ISO, AGMA, SAE, cst, SSU, etc. Al no tener los técnicos información sobre sus equivalencias, la selección se dificulta, los fabricantes de lubricantes y la ISO, ha establecido la siguiente tabla de equivalencias para seleccionar las viscosidades equivalentes a 38 y a 100 °C. Es importante destacar que dicha tabla habla sólo de viscosidades equivalentes pero no de componentes, uso o calidad.

Por ejemplo si un técnico recibe una maquina X que indica que debe de seleccionar para el equipo un lubricante con una viscosidad de 300 SSU a 38°C, deberá calcular la equivalencia de la viscosidad en grados ISO o SAE. La tabla 4.14 muestra los equivalentes de viscosidad en diferentes medidas: si observamos la tabla, para el ejemplo en cuestión tendremos:

Ejemplo 1)

Viscosidad 300 SSU = equivale a Visc. ISO 46 - 68 = equivalente a Visc. AGMA 2

Cabe señalar que en el caso de la viscosidad ISO, se recomienda escoger la viscosidad superior por seguridad es decir la ISO 68.

Ejemplo 2)

Se requiere seleccionar o conocer la viscosidad de un aceite SAE GEAR 140 a 40 °C en grados ISO, AGMA y SSU, entonces de la gráfica observamos que:

SAE G 140 = Equiv. A Visc. ISO 460 = equiv. Visc. AGMA 7 = equiv 2,500 SSU.

La tabla de referencia 4.14, esta basada en aceites con un índice de viscosidad promedio de 95 en aceites de tipo monogrado.

#### 4.15 Criterios de selección de un aceite lubricante industrial

A continuación se presenta una guía base para realizar una selección adecuada de un aceite lubricante industrial ( 10, 18, 4 ):

a) Seleccionar el lubricante adecuado considerando:

- ◆ La viscosidad recomendada por el fabricante
- ◆ Propiedades recomendadas por el fabricante.
- ◆ Temperatura de operación (\* - 15 a 70 °C rango de aplicación de un lubricante mineral, de 70 a 80 °C considere el uso de un lubricante sintético; con temperaturas > 80°C utilice un lubricante sintético)
- ◆ La carga de operación
- ◆ La velocidad de operación del equipo ó sistema
- ◆ Las condiciones ambientales del sistema.

b) Que la aplicación sea en el punto adecuado.

c) En la cantidad estrictamente necesaria.

d) Que se aplique con la frecuencia adecuada.

e) Que se aplique en el sistema libre de contaminantes (agua, partículas, aire, químicos)

f) Con el personal técnico capacitado.

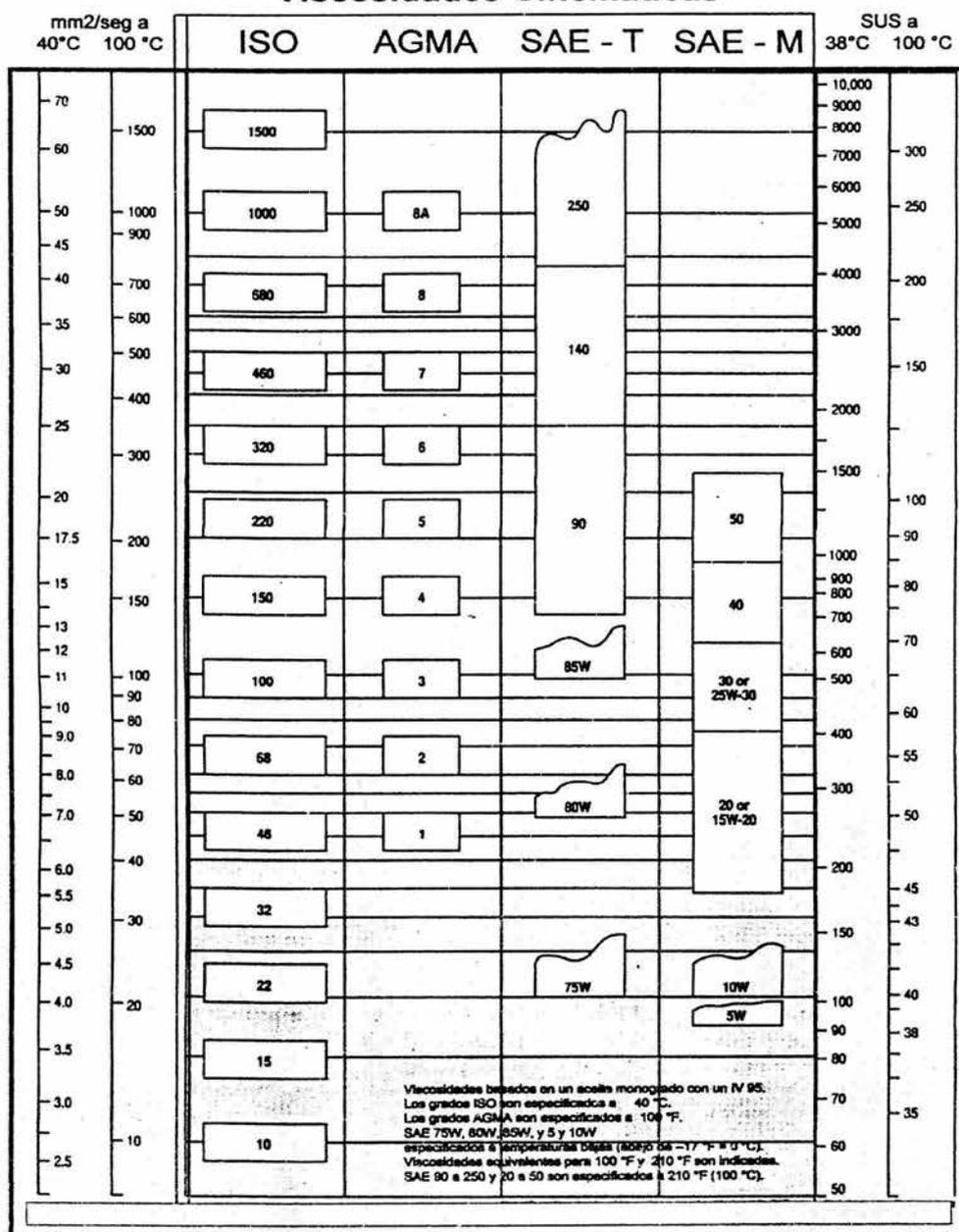
Es importante poder estimar el régimen de lubricación presente en el sistema (hidrodinámico, límite, elastohidrodinámico ó mixto), con el fin de poder evaluar el tipo de fricción y desgaste crítico en el sistema para tomar medidas preventivas en casos de requerirse. Con relación a la viscosidad, una regla práctica de selección se muestra en la siguiente tabla, no obstante se recomienda siempre seguir lo recomendado por el fabricante o puede consultarse a los proveedores de lubricantes en el mercado:

**Tabla 4.15 Rangos de aplicación de viscosidad en lubricantes industriales**

Tipo de Aplicación genérica	Use	Rango de viscosidad ISO
Alta velocidad	Aceite ligero	10 – 32
Baja velocidad	Aceite pesado	220 -680
Carga ligera	Aceite ligero	46 – 150
Carga pesada	Aceite pesado	220 – 1000
Bajas temperaturas (menores a 60°C)	Aceite ligero	32 – 68
Altas temperaturas (mayores a 70 °C)	Aceite pesado	220 – 680

Tabla 4.14 Equivalencias de viscosidad

Viscosidades Cinemáticas

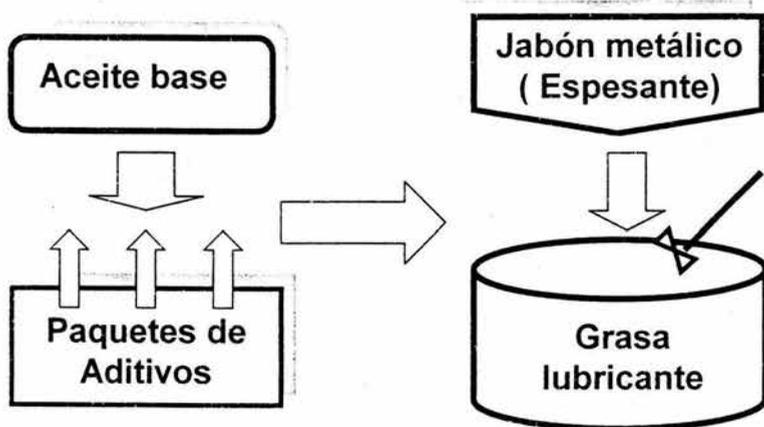


#### 4.16 Grasas lubricantes

La ASTM norma D-288, define a una grasa lubricante como una dispersión semilíquida a sólida de un agente espesante en un líquido (aceite base). La razón de la aplicación de una grasa con respecto a un aceite, se fundamenta en la imposibilidad de poder contener un líquido en un mecanismo ó sistema determinado ó donde la frecuencia de relubricación puede hacer incosteable la aplicación de un líquido, lo anterior se puede deber a la configuración del mecanismo o diseño del sistema. Por su naturaleza esencialmente sólida, las grasas no transfieren el calor ó no enfrían, ni permiten la limpieza de un sistema, como en el caso de la lubricación con un aceite lubricante.

Las grasas consisten en una mezcla de aceite mineral o sintético ( 80 - 90 % ) y un espesante. Al menos en el 90 % de las grasas, el espesante es un jabón metálico, formado cuando un metal hidróxido reacciona con un ácido graso.

#### 4.16 Diagrama de fabricación de una grasa lubricante



El jabón metálico ó espesante, actúa como una esponja contenedora del aceite lubricante, la aplicación típica de una grasa se encuentra en la lubricación de baleros ó rodamientos. Cuando los sistemas se someten a cargas, trabajo mecánico, variación de temperatura y velocidad etc., el espesante libera el aceite contenido en su estructura, lo cual permite lubricar los puntos de contacto. Dependiendo de las características y propiedades del espesante, aceite base y aditivos, será la aplicación de la grasa en el punto de aplicación (11, 24)

Los tipos de grasa más comunes se muestran en la tabla (4.1.6) , pueden observarse los diferentes tipo de espesante (jabón), tipo de aceite base y algunas de sus propiedades en su aplicación, resalta en particular su rango de resistencia a la temperatura cuando se varia el tipo de espesante, otras propiedades de interés son, su resistencia al lavado con agua y a la corrosión, las pruebas ASTM D264 y D1743, caracterizan los rangos de servicio de estos productos.

Las principales funciones de una grasa lubricante en un sistema de lubricación son:

- ◆ Reducir la fricción y el desgaste del elemento lubricado
- ◆ Proteger contra la corrosión
- ◆ Sellar contra polvo y agua
- ◆ Resistir las fugas y goteo en el sistema
- ◆ Mantener su consistencia bajo carga mecánica
- ◆ No solidificarse en operaciones con bajas temperaturas
- ◆ Mantener características físicas óptimas en el sistema de aplicación
- ◆ Ser compatible con sellos, elastómeros y los materiales de construcción
- ◆ Tolerar contaminantes sin pérdida de sus propiedades

Como se señaló, los fluidos denominados newtonianos, son aquellos donde su viscosidad varía ó es proporcional a la fuerza de corte a una temperatura dada. La grasa es un fluido no newtoniano, decir que cuando se aplica una fuerza de corte de un fluido, su velocidad de corte varía, lo que significa que su viscosidad decrece, la viscosidad medida en éstas condiciones se conoce como “viscosidad aparente” y es medida en el laboratorio para diferentes parámetros de flujo y temperatura.

La viscosidad aparente es medida bajo la norma ASTM D1092, esta propiedad es usada para predecir el comportamiento de la grasa en diversas condiciones de servicio y carga, así como sus características y tendencia a la fuga bajo acción mecánica. Para diversas aplicaciones industriales, se requieren grasas estables mecánicamente, una grasa de buena calidad presentan características apropiadas de estabilidad térmica y mecánica, una grasa lubricante de baja estabilidad fugará rápidamente del lugar, permitiendo el incremento de la fricción y el desgaste en el mecanismo, acelerando la probabilidad de falla o fatiga.

Los fabricantes de equipo, en particular rodamientos, así como en sistemas de lubricación mecánico o centralizados donde la grasa requiere ser bombeada en múltiples punto, indican la consistencia adecuada a manejar. Los fabricantes de grasas, las producen diversas consistencias para cumplir los requisitos de operación de los sistemas a lubricar.

Una clasificación de grasa se puede realizar en base a su jabón o espesante ( ver tabla 4.5), cada catión está relacionado con ciertas propiedades de la grasa, por ejemplo, los puntos de fusión de las grasas de jabón de Calcio, es menor a 130 °C, mientras que las de Litio son de aproximadamente 180°C, algunas grasas son fabricadas con mezclas de diversos jabones y se les conoce como grasas mixtas. Existen modificaciones a los jabones originales a cuyas grasas derivadas se les conoce como grasas de “complejo”, estas grasas se fabrican con el jabón original y un agente químico “complejante” de tipo orgánico ó inorgánico, y que le imprime a la grasa propiedades especiales de resistencia a la carga y a la temperatura, con puntos de fusión de hasta 250 °C.

El jabón más común utilizado en la fabricación de las grasas es el jabón de litio y sus complejos, debido a su amplio espectro de aplicaciones y gran versatilidad en sus propiedades de resistencia a la temperatura, carga y estabilidad mecánica.

Existen industrias, como en el caso de las empresas alimenticias y de bebidas, donde existe la posibilidad de contacto lubricante –alimento, y los requisitos de calidad y sanidad, deben de ser aprobadas bajo organismos gubernamentales internacionales como la FDA ( Food and Drug Administration), y la SSA en el caso de México, en dichas grasas los componentes

deben de estar normados y clasificados como no cancerígenos y deben de evitar la formación de colonias ó microorganismos en el proceso.

En el mercado mundial, la distribución del mercado de las grasas, por tipo de jabón metálico, se distribuye como sigue:

- ◆ Grasas a de base Litio - 53 %
- ◆ Grasas a base de Calcio - 18 %
- ◆ Grasas de complejo de Litio - 11 %
- ◆ Grasas a base de Sodio - 3 %
- ◆ Grasas a base de Aluminio - 4 %
- ◆ Grasas de Poliurea - 4 %
- ◆ Resto - 7 %

El criterio de selección de una grasa es muy similar al de un lubricante, sin embargo toma en cuenta una propiedad fundamental en las grasas: su consistencia.

#### 4.17 Consistencia ó Clasificación NLGI

Una de las características más importantes de una grasa es su consistencia, la cual se define como el grado de deformación de un material plástico bajo la acción de una carga. En el caso de las grasas lubricantes es el grado de “dureza” ó “suavidad” de la grasa, dicha propiedad se refleja en la práctica, en su facilidad de fluidez y bombeabilidad. La consistencia está reportada en términos de la norma ASTM D217 ó grado NLGI ( National Lubricating Grease Institute). La consistencia, similar a la viscosidad, varía con la temperatura y se reporta siempre a una temperatura determinada.

La consistencia se determina en el laboratorio en un equipo denominado penetrómetro, que consiste en un cono metálico, el cual se deja caer libre bajo su propio peso, sobre la grasa por un lapso de 5 segundos. La profundidad a la que el cono penetra es leída y reportada como la penetración de la grasa en mm. Una mayor profundidad y lectura del cono indicará una grasa más blanda ó menos dura. La NLGI asigna un número para cada consistencia o penetración trabajada en el laboratorio. (ver tabla 4.5.1)

**Tabla 4.17 Consistencia de grasa bajo especificación NLGI**

Consistencia NLGI	Penetración trabajada (0.1mm)	Estructura	Aplicación general
000	445....475	Fluida	Cajas de engranes
00	400....430	Casi fluida	Sistemas
0	355....385	Extremadamente suave	centralizados
1	310....340	Suave	Lubricación de
2	265....295	Blanda	baleros en general y
3	220....250	Moderada	chumaceras
4	175....205	Rígida	Grasas para sellos de
5	130....160	Muy rígida	laberinto y tapas
6	85....115	Sólida	

**Tabla 4.1.6. Características de grasas lubricantes**

<b>Espesante</b>	<b>Aceite base</b>	<b>Aplicación típica</b>
Calcio ( Ca-12-hidroxiestearato)	Aceite mineral	Grasa para sellado temperatura de servicio -20 a 70 °C
Litio ( Li-12-hidroxiestearato)	Aceite mineral	Rodamientos de bolas antifricción
	Aceite éster	Grasa de baja y alta temperatura Grasa de alta velocidad
	Aceite Poliglicol	Grasa de alta temperatura
	Aceites de silicón	Grasa de baja temperatura Temperaturas de servicio - 60 hasta 160 °C
Jabón de Sodio	Aceite mineral	Grasa estándar para rodamientos planos Temperatura de servicio - 20 a 100 °C
Complejo de Aluminio	Aceite mineral	Grasa de alta temperatura Temperatura de servicio - 30 a 120 °C
Complejo de Bario	Aceite mineral	Grasa de extrema presión
	Aceite éster	Grasa de alta velocidad, extrema presión y baja temperatura. Temperaturas de servicio - 40 a 120 °C
Complejo de Calcio	Aceite mineral	Grasa de extrema presión
	Aceite éster	Grasa sellante de baja temperatura Grasa de alta velocidad, extrema presión y baja temperatura Temperatura de servicio - 50 a 170 °C
Complejo de Sodio	Aceite mineral	Grasa de alta temperatura.
	Aceite silicón	Grasa de larga duración Temperatura de servicio ( - 50 a 200 °C
Bentonita	Aceite mineral	Grasa de alta temperatura Temperatura de servicio - 30 a 160 °C
Poliurea	Aceite mineral	Grasa de alta temperatura
	Aceite éster	Grasa de alta temperatura y duración
	Acete polifeniléter	Grasa de alta temperatura y duración. Temperatura de servicio - 40 a 200 °C
Plástico ( PTFE, PE, FEP)	Aceite silicón	Grasa de alta temperatura y larga duración
	Aceite perfluoroalquiléter	Grasa de alta temperatura, lubricación de “por vida” Temperatura de servicio - 40 a 250 °C

#### **4.18 Clasificación de grasas por aplicación.**

Existen diversos tipos de grasas en el mercado, pero se pueden clasificar según su aplicación general:

Grasas según su aplicación:

- ◆ Grasas para baleros
- ◆ Grasas para chasis
- ◆ Grasas automotrices multipropósitos
- ◆ Grasas especiales para aviación
- ◆ Grasas para rodamientos antifricción
- ◆ Grasas para rodamientos planos
- ◆ Grasa de alta y baja temperatura
- ◆ Grasas de alta velocidad
- ◆ Grasas grado alimento FDA
- ◆ Grasa para engranes abiertos
- ◆ Grasas industriales multipropósitos
- ◆ Grasas para trabajo pesado
- ◆ Grasas especiales PTFE

#### **4.19 Criterios de selección de una grasa.**

Como en el caso de los aceites, a continuación se indican los factores e información a considerar en la selección adecuada de una grasa

- ◆ Tipo de grasa indicada por el fabricante, particularmente el tipo de espesante.
- ◆ Consistencia NLGI para el diseño del sistema
- ◆ En el caso de rodamientos, considerar, además de los factores señalados, la viscosidad aceite base de la grasa.
- ◆ En operaciones de alta temperatura, considerar el tipo de espesante, consistencia viscosidad del aceite y tipo ( mineral o sintético)
- ◆ En operaciones de baja temperatura, el tipo de espesante, consistencia, viscosidad del aceite y tipo ( mineral o sintético).
- ◆ En el caso de aplicar la grasa por medio de un sistema centralizado, es de suma importancia consistencia de la grasa.
- ◆ En aplicaciones de alta carga, considerar la viscosidad del aceite y los aditivos como fundamentales en su eficiencia.
- ◆ En aplicaciones de altas velocidades considerar la viscosidad, consistencia y factor de velocidad de aplicación.

En la selección de una grasa, intervienen más variables que en el caso de los aceites, sin embargo el criterio de aplicación es muy similar al de éstos, la temperatura del sistema, las

condiciones de carga, la velocidad y las condiciones de operación y ambientales, siempre proporcionarán una guía base para una óptima selección. ( 5, 6)

#### 4.20 Pruebas estándares de laboratorio para aceites y grasas lubricantes

Dado que los lubricantes son mezclas de hidrocarburos, la composición de los mismos presenta diversas variaciones en su estructura química, las propiedades fisicoquímicas son entonces de importancia fundamental para su selección, en la tabla 4.20.a, se presentan los principales pruebas típicas, para determinar la calidad e identificación de las grasas lubricantes y en la tabla 4.20b, las pruebas para los aceites, según las normas internacionales ASTM y DIN.

**Tabla 4.20.a Pruebas típicas de laboratorio de los aceites lubricantes**

Datos característico	Ensayo	Observaciones
Color / Índice de color	ASTM D1500 / DIN 51 411 ISO 2049	Determinación del color por medio de colorímetro ó según Saybolt
Densidad	ASTM D-287 DIN 51 757	Cociente masa / Volumen
Punto de inflamación	ASTM D92 y D93 DIN ISO 2592	La temperatura más baja a la que se inflama la mezcla de aire y vapor sobre un crisol, con encendido externo.
Contenido de cenizas	ASTM D482 y D874 DIN 51 575 DIN EN 7	Residuo remanente como óxido o sulfato de la incineración; ceniza de sulfato sólo par aceites con aditivos metal-orgánicos y para aceites usados.
Viscosidad	ASTM D445 y D88 DIN 51 561	Medida de la resistencia opuesta por un líquido al flujo.
Resistencia a la emulsión	ASTM D1401 y D2711 DIN 51 589	Resistencia de un aceite al emulsionamiento
Índice de saponificación(IS)	ASTM D664 y D994 DIN 51 559	Indica el número de mg de KOH necesarios para neutralizar los ácidos libres contenidos en 1 gramo de aceite y saponificar los ésteres existentes.

Punto de fluidez crítica	ASTM D97 DIN ISO 3016	Temperatura a la que una muestra de aceite lubricante todavía fluye, al enfriarla bajo condiciones normalizadas
Relación Viscosidad temperatura ( VT )	ASTM D88 y D445 DIN 51563	Representación de la viscosidad de un aceite lubricante en función de la temperatura.
Índice de viscosidad	ASTM D567 DIN ISO 2909	Caracteriza el cambio de viscosidad con la temperatura
Pérdida por evaporación	DIN 51 581	Determinación cuantitativa de la evaporación del aceite a temperatura elevada
Relación entre la viscosidad y la presión	-----	Viscosidad de un aceite lubricante en función de la presión
Contenido de agua	ASTM D95, D96 y D1744 DIN ISO 3733	Ensayo cualitativo : (Crepitación), al calentar el aceite en una probeta a > 100 °C se produce una crepitación al evaporarse el agua. Ensayo cuantitativo : El aceite lubricante se calienta usando un condensador de reflujo con xileno o hidrocarburos, p/ej : gasolina p.eb. especial > 100 °C, recogiendo el agua destilada en un recipiente graduado.
Capacidad de dispersión del aire	DIN 51 381	Determinación del aire dispersado en un aceite lubricante

Referencias (11, 14)

**Tabla 4.20.b Pruebas típicas de laboratorio para grasas lubricantes**

Dato característico	Ensayo	Observaciones
Consistencia NLGI	ASTM D217 ISO 2137	Determinación de la dureza o blandura de una grasa por Penetrómetro.
Viscosidad aparente	ASTM D-287	Según Viscosímetro Brookfield Spindle No.7, 10RPM 25 y 77°F C
Punto de goteo	ASTM D566 y D2265 DIN 51801/PtI	La temperatura la cual la grasa pasa de sólida a líquida
Estabilidad mecánica	ASTM D1813 DIN 2137	Habilidad de la grasa para mantener su aspecto y consistencia bajo operación crítica.
Corrosión	DIN 51 802	Capacidad de la grasa para mantener sus propiedades sellantes y de protección contra la corrosión.
Estabilidad a la oxidación	ASTM D943 DIN 51 811	Estabilidad de la grasa contra el deterioro químico.
Resistencia al lavado con agua	ASTM D1743 DIN 51 807	Indica la resistencia de la grasa y su estabilidad y consistencia contra el lavado con agua.
Prueba de resistencia de aditivos EP – TIMKEN	ASTM D2509 y D2783	Muestra las características de protección de los aditivos de extrema presión, bajo carga
Prueba de desgaste mecánico de 4 bolas	ASTM D2596 y D2783 DIN 51350	Determina la carga máxima de resistencia de película lubricante, hasta provocar una soldadura en cuatro bolas de acero normadas
Ensayo en equipo SRV	DIN 51834	Representa el comportamiento del coeficiente de fricción en el punto de carga, bajo condiciones mecánicas establecidas, determinando huella de desgaste y sedimentos.

#### 4.21 Acidez y Basicidad en lubricantes.

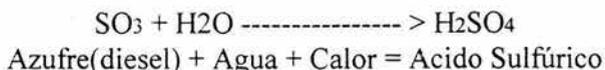
La acidez ó número ácido TAN, es la medida de la cantidad de KOH necesario para neutralizar los ácidos presentes en un lubricante usado y debe compararse contra la acidez inicial del aceite original. Esta medida es de suma importancia en lubricación ya que de ella depende la factibilidad de que se presente ataque corrosivo en un equipo. En el caso de los motores de combustión interna, el desgaste corrosivo se incrementa como resultado de los ácidos formados por la combustión. Cuando esta se realiza, el Carbono reacciona con el Oxígeno generando monóxido y bióxido de carbono; el hidrogeno reacciona con el oxígeno produciendo vapor de agua, por último el azufre presente en el combustible generando bióxido de azufre. La mezcla anterior en condiciones de alta temperatura y con trazas de humedad, dan como resultado la formación de ácidos sulfúricos y sulfurosos que pasan entre los anillos y pistones hasta el carter contaminando el aceite. Los métodos ASTM D-664 y ASTM D-794 establecen las pruebas para evaluar la acidez de un lubricante usado. La medida del TAN generalmente se aplica a lubricantes de tipo industrial.

Los límites de control típico para el índice TAN son:

	<b>ZDDP y aceites ácidos con aditivos antiherrumbre.</b>	<b>Otros aceites</b>
Rango TAN como aceite nuevo	0.6 – 1.5	0 – 0.6
Limite de precaución	Punto de inflexión mayor a 0.2	TAN inicial mas 0.2
Limite crítico	TAN inicial mas 1.0	TAN inicial mas 1.0

Los límites críticos generalmente sugieren un análisis del tiempo de vida útil del lubricante en el sistema, del cambio del producto usado por uno nuevo, de la limpieza del sistema de lubricación, y de un análisis de la causa-efecto del incremento de la acidez en el mismo. Cuando el aumento de la viscosidad en un aceite es debido a la oxidación, el número TAN generalmente se incrementa, una elevada concentración de peróxidos en el aceite es más peligrosa que la presencia de ácidos en el sistema debido a su acción corrosiva., una medición del pH del sistema por debajo de 4 se considera que inicia un ataque corrosivo en las superficies y es un indicativo de un cambio de lubricante en el sistema.(1, 12)

Por otro lado, el número total de basicidad, también llamado TBN por sus siglas en inglés, se define como la medida de la capacidad o porción alcalina que debe contener un aceite lubricante de combustión interna, para contrarrestar los efectos de los ácidos generados durante la combustión del combustible diesel. La importancia del conocimiento del TBN en un lubricante de motor diesel, radica en el hecho de siempre se generarán compuestos ácidos dispersos en el aceite, los cuales, pueden causar un ataque químico en el motor, una reacción típica general sería:



El TBN en un aceite de motor está relacionado con su capacidad de detergencia – dispersión; a medida que disminuye, se reduce la capacidad de limpieza del aceite, en especial en la cabeza del pistón y en los anillos de compresión. Un aceite con un TBN de 12 tiene una eficiencia en la capacidad de limpieza de las partes del 90% aproximadamente, a medida que disminuye se reduce esta capacidad; así un aceite con TBN de 4 tendrá una eficiencia del 60%.

Es importante señalar, que los combustibles diesel varían en calidad y porcentaje de Azufre en los Estados Unidos y México y los requisitos generales de TBN también varían, por ejemplo:

<b>E.U. - Porcentaje de Azufre en el combustible &lt; 0.5</b>	<b>TBN en el aceite 10 exigible</b>
<b>México - Porcentaje de Azufre en el combustible &gt; 1</b>	<b>TBN en el aceite 20 mínimo</b>

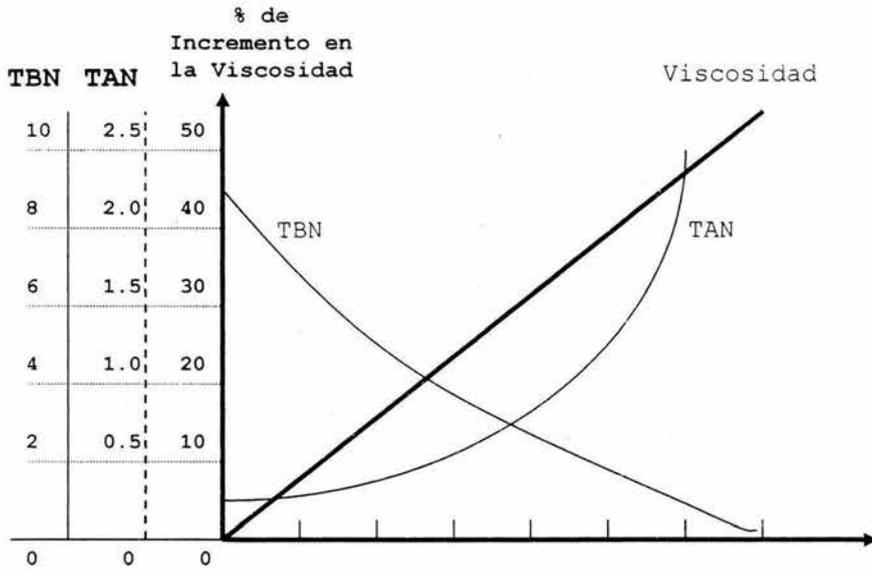
Lo anterior es importante ya que el TBN del aceite afecta su periodicidad de cambio, por ejemplo cuando el porcentaje de Azufre en un aceite es mayor de un 1%, no es posible extender el kilometraje de uso de un lubricante con TBN de 10 a más de 5,000 Km, ya que las pruebas de campo han demostrado altas concentraciones de Fe y Cr, lo anterior significa un alto desgaste interno; para extender el kilometraje hasta por ejemplo 12,000 Km, se recomienda utilizar un lubricante con TBN mínimo de 20.

Los fabricantes de motores indican las especificaciones del aceite y sus periodos de cambio recomendados, se sugiere siempre seguir las indicaciones del fabricante como:

- Seleccionar un aceite según su clase MIL-L-2104C
- Que la medida alcalina sea 20 como mínimo
- Conozca características del combustible que está usando y en que áreas trabajan sus unidades.
- Seguir las instrucciones de cambio de filtro

En los motores de combustión del tipo diesel, los fabricantes especifican el TBN que el lubricante debe de contener, para obtener una eficiencia operacional determinada. Existe literatura técnica más profunda, sobre las pruebas, especificaciones y procedimientos de mantenimiento adecuado en motores diesel, las cuales no son tratadas en el presente trabajo, pero el concepto y conocimiento del TBN en un lubricante para motor diesel, es de suma importancia en el análisis de lubricantes automotrices.( 19,21).

Gráfica 4.21 Variación del TBN, TAN y de la viscosidad de un aceite para motor.



## 5) Administración y planeación de la lubricación.

### 5.1) Relación entre los costos de mantenimiento y una óptima lubricación.

La lubricación y su adecuado control es una de las funciones más importantes dentro de un proceso productivo, una falla en su organización puede afectar seriamente las labores de mantenimiento y producción en una planta de proceso. Una de los errores más comunes en nuestra industria, es el hecho de considerar a la lubricación y sus actividades, como un proceso secundario enfocado más al cuidado de la máquina que a la utilidad y eficiencia de la misma. Uno de las razones de tal comportamiento es la ignorancia sobre la importancia de la lubricación como una herramienta fundamental para el control de la fricción y el desgaste, y como una medida efectiva para incrementar eficiencia y confiabilidad de una máquina.

Las labores de supervisión de un proceso productivo, implican la administración de los materiales de proceso, del personal operativo y el mantenimiento productivo de la maquinaria o equipos involucrados, en México como en muchos países latinoamericanos, el mantenimiento de la maquinaria no se ha llevado a cabo con la profesionalización adecuada, existiendo en una gran mayoría de casos, procedimientos de mantenimiento y cuidado de los equipo de tipo correctivo, más que preventivo o proactivo, basados en la confiabilidad operativa.

En relación con la lubricación se siguen manteniendo en la actualidad prácticas no eficientes en su organización, planeación y aplicación, generando ineficiencia y costos ocultos en el mantenimiento industrial. Una buena planeación de la lubricación para transformarla en un factor productivo, implica el conocer programas sistematizados de administración del mantenimiento y confiabilidad, con personal bien entrenado y capacitado.

Existe una idea generalizada de que la labor de lubricar consiste únicamente en aplicar grasa o aceite a una máquina y que entre mayor sea la cantidad aplicada al mecanismo ó equipo, mayor será su protección y eficiencia. Se cree además que entre mayor sea la viscosidad utilizada por el fabricante, este podrá soportar mayores cargas o presentará menor desgaste. En muchas ocasiones se improvisan las tareas de lubricación, dejándolas en manos de personas que poco a nada tiene que ver con este campo. ¿Será posible entonces que una persona no entrenada o capacitada en mecánica y lubricación, aplique el lubricante adecuado, en el lugar adecuado y en el tiempo adecuado?, definitivamente no.

Este es uno de los errores más comunes que se deben de corregir en la práctica industrial de la lubricación, para poder obtener resultados confiables de operación y eficiencia. Un buen programa de lubricación no depende sólo de las políticas de mantenimiento y producción, ni del personal involucrado, sino de una misión común de toda la empresa, iniciando desde la gerencia.

Un programa de mantenimiento integral y lubricación que no involucre a la gerencia esta condenado al fracaso. El técnico en lubricación en Alemania por ejemplo, dentro del personal de mantenimiento, además de ser buen mecánico esta bien preparado en lubricación, y ocupa el lugar más alto entre el personal de mantenimiento, sin embargo en nuestro país, se considera al lubricación o al personal lubricador como el de más baja categoría.

Un programa de lubricación y una planeación adecuada en una planta debería de ser el programa clave a realizar y todo el personal productivo debería estar involucrado en su cumplimiento y éxito.

Por otro lado, desde el punto de vista financiero, el lubricante representa un máximo del 4% en promedio sobre los presupuestos totales de mantenimiento industrial (15, 21). Estudios de ingeniería de costos industriales en plantas de proceso, han revelado que sólo un 3 a 4% de los costos totales de mantenimiento en la maquinaria de proceso, se destina a la compra de lubricantes. Sin embargo, la selección adecuada, administración, implementación y capacitación de cómo utilizarlos para obtener el máximo rendimiento en su maquina, son quizá, los factores que más afectan los costos totales del mantenimiento de un equipo. Es decir, un error en la implementación y administración de la lubricación, puede incrementar los restantes costos de mantenimiento de los equipos y maquinaria. Estos costos directos e indirectos, que generalmente están ocultos, se distribuyen en incrementos graduales en los presupuestos de:

- Refacciones
- Mano de obra
- Costos de desecho
- Costos de limpieza
- Tiempos muertos no proyectados.

Los costos anteriores, pueden llegar en ocasiones a superar la utilidad de operación de un proceso.

No obstante lo anterior, estudios y programas profesionales de ingeniería de lubricación han demostrado que, con una selección optima de sus lubricantes, una adecuada administración de los mismos, e implementando programas profesionales de calidad en ingeniería de lubricación, sus costos y presupuesto de mantenimiento, pueden optimizarse de manera extraordinaria.

### 5.a Presupuesto típico de mantenimiento de maquinaria



El costo total de la lubricación y su efecto en los costos de mantenimiento, sólo pueden ser determinados adecuadamente por profesionales en el campo de la tribología y la lubricación. Es importante resaltar que un error en la selección y administración, puede impactar e incrementar los costos promedio de mantenimiento señalados en el presupuesto, sin embargo se tienen estudios concretos en la industria (22,23), que una mejora en la optimización de la lubricación, puede reducirlos en más de un 20% en periodos menores a un año.

La situación que impera es que no se considera a la lubricación como una forma de mantenimiento productivo o de recuperación de capital simplemente por incrementar la confiabilidad operacional, sino como una parte de mantenimiento no productivo como una labor secundaria en la maquinaria. La situación anterior con relación a los costos, se puede visualizar como un "Iceberg", donde el costo de una lubricación deficiente oculta otros costos de operación que generalmente no se conocen, por no analizar la causa-efecto de un fenómeno de desgaste no controlado y por ignorancia técnica o deficiencia en el conocimiento de los beneficios de la Lubricación y la Tribología en una planta de proceso.

A continuación se presentan las recomendaciones básicas de control, organización y planeación de la lubricación, con el fin de obtener un programa eficiente y productivo.

#### 5.1b Costo de lubricante y lubricación, vistas como un ICEBERG



## 5.2) Áreas involucradas en un programa profesional de lubricación.

Se recomienda que todos los departamentos señalados y aun otros que tengan ingerencia en el proceso productivo, deberán de involucrarse en un plan de lubricación profesional:

Gerencia (Motiva, fija los objetivos, presupuesto, y ayuda al desarrollo)

Departamento de Mantenimiento (Motiva, fija tareas, organiza, mide, auxilia y capacita, selecciona y cuida los lubricantes apropiados)

Departamento de Producción (Motiva, fija estándares de producción y eficiencia, evalúa rendimiento de maquinas y su producción)

Departamento de compras (Coordina las compras y abastecimiento de los lubricantes seleccionados)

Almacén (cuida, organiza, mantiene inventarios adecuados, racionaliza y facilita el surtimiento de los lubricantes seleccionados).

Un error común es el de dejar en el departamento de compras la decisión o las sugerencias de los lubricantes que se deben de emplear en una planta ya que generalmente, conocen poco en este campo y muchas veces de manera inconsciente, sacrifican calidad por precio, o caen en errores de selección por el mismo motivo, generando ineficiencia en el proceso productivo. (18, 23).

## 5.3) Información básica para la organización de la lubricación en planta.

Para lograr un programa de lubricación eficiente y constructivo, la STLE (Society of Tribologists and Lubrication Engineers), recomienda los realizar los siguientes pasos:

1) Elaboración de un cuadro de lubricación detallado por equipo, línea, proceso, planta.

Objetivo: Permite identificar los equipos y puntos de lubricación críticos, lubricante apropiado y auxilia en planeación de las labores a realizar, el cuadro deberá de incluir:

- Nombre del equipo a lubricar
- Parte del equipo a lubricar
- Nombre y tipo de lubricante a utilizar
- Método de aplicación
- Frecuencia de aplicación

2) Censo de los lubricantes utilizados en la planta.

Objetivo: Estimar volúmenes mínimos, presupuesto, compras, y permite racionalizar y controlar inventarios.

- Descripción del tipo de lubricante (Descripción, viscosidad, grado, origen, calidad)
- Volumen utilizado por mes-año
- Presentación del envase
- Método de aplicación
- Tiempo de vida útil estimado

3) Ruta de lubricación o trabajo programado.

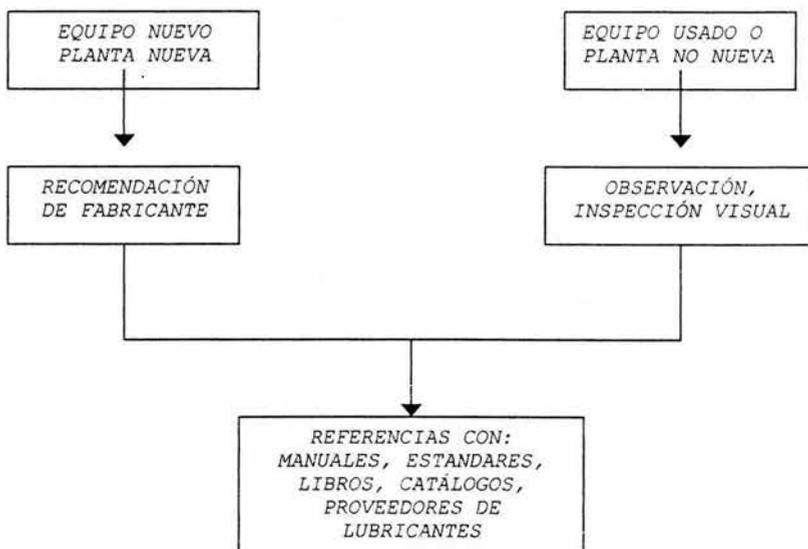
Permite planear el orden en que los mecanismos deben de ser lubricados, de forma que se optimice el tiempo, tareas y personal requerido.

- Descripción del tipo de lubricante (viscosidad y origen)
- Volumen utilizado por mes-año
- Presentación del envase
- Método de aplicación
- Tiempo de vida útil estimado

Dependiendo de la magnitud y complejidad de los procesos y equipos involucrados, el manejo de la información puede hacerse muy complejo y surge la necesidad de sistematizar la información, por lo que se recomienda la adquisición de software de mantenimiento o lubricación, específicamente diseñados para tal fin.

En la tomas de datos para captar y efectuar los controles anteriores, se recomienda siempre seguir las recomendaciones del fabricante en particular cuando la máquina es nueva, cuando la máquina o el proceso no es nuevo y no se cuenta con manuales o información del mantenimiento, se sugiere realizar una inspección visual del equipo y tomar referencia de estándares, equipos similares y proveedores de lubricantes.

**Figura 5.3.1 Toma de información de lubricación en un equipo**



Se recomienda o asociar la identificación o código del equipo, y señalar o etiquetar los puntos de lubricación del mismo, de forma tal que cualquier persona pueda identificarlos.

#### 5.4) Recomendaciones básicas para la planeación de la lubricación en planta

Se recomiendan las siguientes técnicas para hacer más eficiente el proceso de planeación de la lubricación:

- Divida el trabajo en términos de la frecuencia de aplicación
- Divida el trabajo por método de aplicación y grado de viscosidad del lubricante.
- El orden de la programación deberá estar fundamentado en rutas continuas de trabajo

Controles.- Para auxiliar en el manejo racional de la información se requiere centralizar la información que contengan los cuadros de lubricación detallados descritos anteriormente, se recomienda generar los siguientes controles:

- Control de consumos periódico de consumo de lubricantes (diario, semanal, mensual, semestral, o anual)
- Cuadros o ayudas visuales que contengan los avances anuales de las labores de lubricación.
- Cuadros de rutas diarias de trabajo, en forma semanal y mensual.
- Control histórico del mantenimiento: indica reparaciones, tipo de mantenimiento realizado, cambios o modificaciones en el diseño, cambios en las condiciones de operación o cualquier problemática observada en el equipo.

#### 5.5) Control de fugas

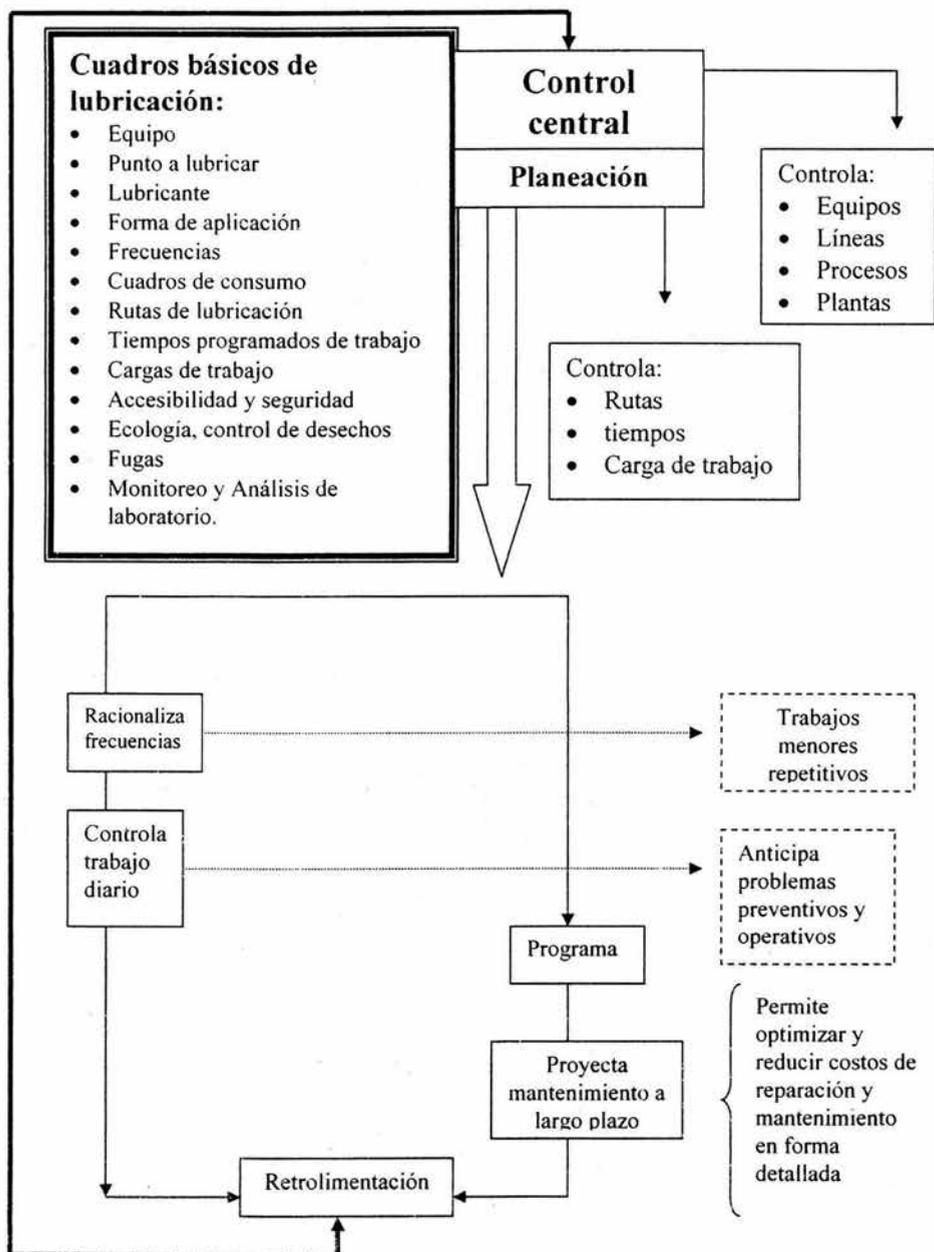
Dentro de la organización y control de la lubricación, existe un descuido generalizado en el control de las fugas de aceite a través de retenedores y empaquetaduras, estas pueden ser consecuencia de sellos o retenes en mal estado, altas temperaturas ó altos niveles de aceite. En la mayoría de los casos, se toma como medida correctiva adicionar aceite para compensar la falta, pero sin identificar la causa. Lo anterior provoca altos consumos, incrementando los costos de lubricación. Un método sencillo consiste en realizar inspecciones visuales de los equipos e identificar goteos o formación de charcos de lubricante o grasa, posteriormente poner una etiqueta o señal que indique la fuga, para en una tercera etapa proceder a la programación de la reparación de la fuga. La tabla siguiente indica la pérdida de lubricante en diferentes niveles y su costo estimando un precio promedio base.

**Tabla 5.5.1 Consumo y costo estimado de aceite por fugas durante un periodo determinado**

(\*) Costo promedio por litro - \$10.00 litro

Cantidad	Consumo de aceite en litros			Valor por año
	Por día	Por mes	Por año	
1 gota en 10 seg	0.420	12.71	152.6	\$ 1,526.00
1 gota en 5 seg	0.851	25.50	306	\$ 3,060.00
1 gota por seg	4.25	127.7	1,533	\$ 15,330.00
3 gotas por seg	14.1	425.8	5,109	\$ 51,090.00

Figura 5.4 Diagrama de flujo en la planeación de la lubricación



## 5.6) Frecuencias aproximadas de lubricación en equipos.

Las frecuencias con que se lubrican los equipos en una planta no deben de ser arbitrarias, sino que deben de estar basadas en criterios técnicos y de análisis de laboratorio. El fabricante de un equipo, después de haber realizado pruebas en planta, recomienda las frecuencias promedio, especificaciones estándares de los lubricantes a utilizar, así como la forma y cuidados especiales. La primera regla es seguir las recomendaciones dictadas por el fabricante, sin embargo en los últimos años y con el avance de los análisis de laboratorio y calidad de los lubricantes, los nuevos programas de monitoreo de lubricantes nuevos y en uso, permiten identificar profundamente y de manera más racional, las condiciones físicas y químicas del lubricante, así como los niveles de contaminación y de desgaste del equipo. La información obtenida, permite obtener criterios de decisión para proceder al cambio o extender la vida del lubricante en el equipo. El enfoque es minimizar los costos directos de los lubricantes utilizados, además de controlar los costos e impactos ambientales por el desecho de los mismos. (22, 18)

**Tabla 5.6.1 Frecuencias aproximadas de lubricación en varios equipos y mecanismos.**

FRECUENCIAS		
EQUIPO	Revisar y aplicar si es necesario	Cambio Total Promedio (Meses)
<b>I) COJINETES Y RODAMIENTOS</b>		
Rodamientos con grasera	Cambio total de grasa al año	3 meses
Rodamientos con grasa empacada	No se recomienda relubricar, seguir recomendación de fabricante	6-12 meses
Cojinetes lisos con aceite (anillo, collar, etc.)	Diario	Cambiar cada 6 meses
Cojinetes lisos con grasera	Verificar temperatura y niveles diario o semanal	Cambio total mensual.
<b>II) REDUCTORES Y ENGRANAJES</b>		
Reductor con aceite	Verificar nivel diario o semanal	Cada 6 a 12 meses
Reductor con grasa	Verificar nivel diario o semanal	Cada 6 meses
Engranajes abiertos con aceite	Diario	6 meses *
Engranajes abiertos con grasa (manual)	Diario	3 meses
Engranaje abierto con sistema centralizado - grasa	Verificar nivel diario o semanal	Mes
<b>III) SISTEMAS CENTRALIZADOS</b>		

Sistema centralizado con aceite a pérdida	Diario	
Sistema centralizado con aceite a grasa a pérdida.	Diario	
Sistema centralizado de circulación	Semanal	6 - 12 meses *
<b>IV) CADENAS</b>		
De rodillos engrasadas	Semanal	
De rodillos aceitadas	Diario	
De rodillos por inmersión	Semanal	6 - 12 meses *
De rodillos por sistema de aspersión.	Diario	
Excéntricas aceitadas	Por turno	
Excéntricas engrasadas	Por turno	
<b>V) ACOPLAMIENTOS</b>		
Acoplamiento engrasados	Semanal	6 - 12 meses
Acoplamiento aceitados	Semanal	
<b>VI) GUIAS</b>		
Guías aceitadas	Por turno	
Guías engrasadas	Por turno	
<b>VII) SISTEMA NEUMÁTICO</b>		
Lubricador en línea	Diario	
<b>VIII) SISTEMAS HIDRÁULICOS</b>		
	Semanal	6 - 12 meses
<b>IX) COMPRESORES</b>		
Compresores de aire de pistones	Diario	3 - 6 Mineral * 1- 2 años sintético *
Compresores de aire Rotativos	Diario	3 - 6 Mineral * 1- 2 años sintético *
Compresores de aire de Tornillo	Diario	1- 2 años sintético *
<b>X) VARIOS</b>		
Motores de gasolina estacionarios	Diario	
Motores Diesel Estacionarios	Diario	
Cables	Mensual	
Motores eléctricos con grasa	Semanal	6- 12 meses

(\*) Las frecuencias en aceites de depósito, están sujetas a los resultados de laboratorio que se efectúen.

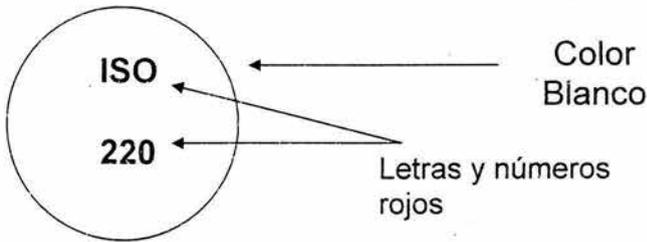
En la Tabla 5.6.1 anterior, muestra algunas frecuencias de lubricación en condiciones de operación estándares de fabricantes y proveedores de lubricantes:

Cabe señalar que estas frecuencias están basadas en condiciones estándar de operación, temperatura máxima de 70 °C y en sistemas sellados, sin contaminantes severos, considerando aceite de origen mineral y grasas minerales base litio, los periodos indicados son

promedio y deberán de ajustarse si la temperatura es alta y las cargas y condiciones de servicio, polvo, agua, vapor, son severas.

Una buena práctica consiste en marcar los puntos de lubricación de los equipos con símbolos estándares establecidos internacionalmente para identificar las frecuencias y con colores el tipo de lubricante, dentro de cada símbolo aparece la palabra ISO o SAE. (esquema 5.6.2 y 5.6.3)

#### Esquema 5.6.2 Ejemplo de simbología para identificar equipos y su lubricación



Se sugiere utilizar un color para cada símbolo que indica el tipo de aceite (tabla 5.6.4) la forma indica la frecuencia, y los números la viscosidad ISO, SAE o la consistencia NLGI de la grasa.

#### 5.7) Almacenamiento de los lubricantes.

Uno de los factores que se deben de considerar para una adecuada administración de la lubricación es la organización y control del almacén de lubricantes: Se deben de tener en cuenta determinadas normas y requisitos durante su manipulación, almacenamiento y distribución, a continuación se listan los parámetros más importantes:

- Adecuada protección y manejo de los envases bajo techo y al exterior.
- Distribución y dispositivos de seguridad de la bodega.
- Forma de almacenamiento de los diversos recipientes.
- Tipo de recipientes para su aplicación
- Protección y manejo por el usuario
- Limpieza

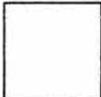
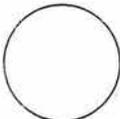
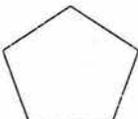
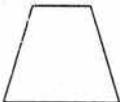
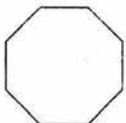
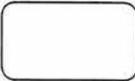
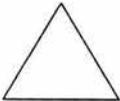
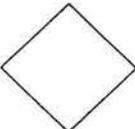
Existe variada información sobre los puntos anteriores (18,1) , que pueden ser utilizados y adaptados a las condiciones y necesidades específicas de una planta, sin embargo el factor más importante a controlar es quizá la limpieza del área o almacén seleccionado para los lubricantes. El polvo, envases a la intemperie, manipulación con equipos o envases sucios, contaminación con agua u otros productos, contaminación a la intemperie, afectan en mayor o menor grado las propiedades fisicoquímicas de los lubricantes hasta el punto de dejarlos inservibles antes de ser utilizados.

Otros factores a considerar es la manipulación incorrecta, la contaminación con otros lubricantes, almacenamiento a temperaturas anormales y el almacenamiento durante largos

periodos, estos factores, afectan también la eficiencia y propiedades del lubricante. Se recomienda consultar con los proveedores de los lubricantes las sugerencias y reglas para el correcto almacenamiento y manipulación, así como las guías sobre los puntos anteriormente señalados.

En la figura 5.7.1 se muestra un esquema básico de un cuarto auxiliar de almacenamiento de lubricantes con las áreas y las secciones de control y almacenaje fundamentales.

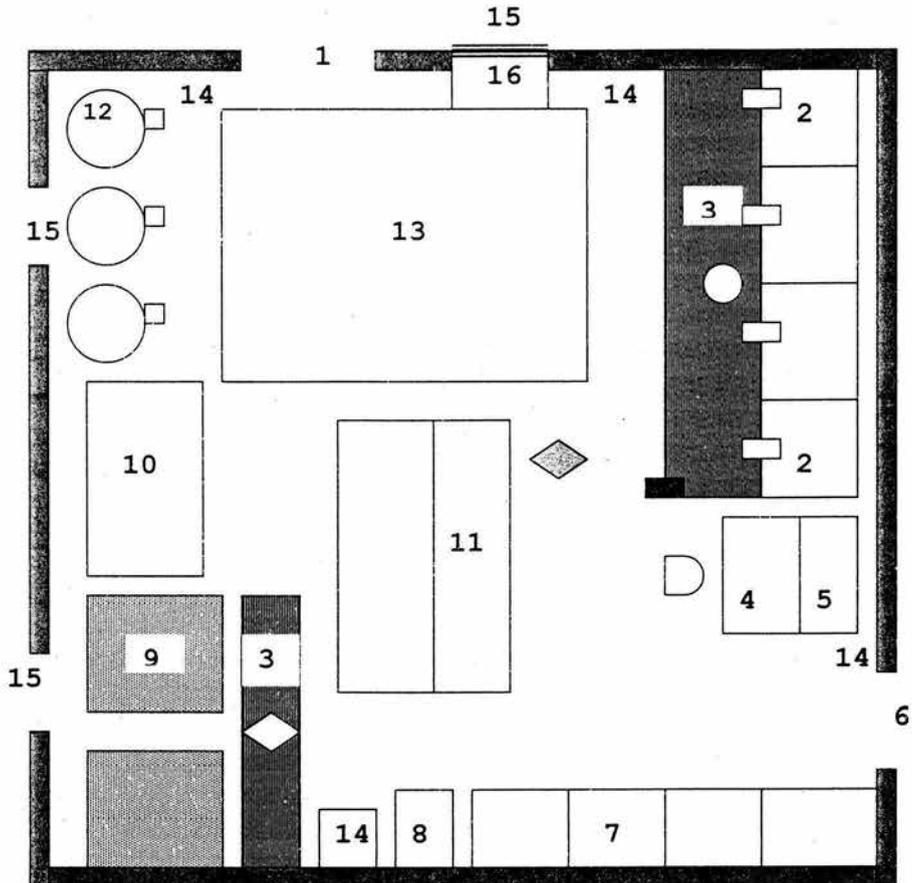
### Esquema 5.6.3 Símbolos geométricos para especificar frecuencias de lubricación

	<i>TURNO</i>		<i>MENSUAL</i>
	<i>DIARIO</i>		<i>BIMENSUAL</i>
	<i>CADA DOS DIAS</i>		<i>TRIMESTRAL</i>
	<i>DOS VECES A LA SEMANA</i>		<i>SEMESTRAL</i>
	<i>SEMANAL</i>		<i>ANUAL</i>
	<i>QUINCENAL</i>		

**Tabla 5.6.4 Código Internacional de colores para la identificación de aceites lubricantes**

<b>Aceite</b>	<b>Grasa</b>	<b>Color identificación aceite</b>	<b>Color del nombre del aceite</b>	<b>Color del círculo</b>	<b>Color del número del círculo</b>
Turbinas de vapor hidráulicas y de gas		Amarillo	Negro	Negro	Amarillo
Reductores y motoredutores		Blanco	Rojo	Rojo	Blanco
Bombas centrifugas y alternativas		Morado	Blanco	Blanco	Morado
Sistemas hidráulicos		Verde oscuro	Blanco	Blanco	Verde oscuro
Compresores de aire		Rojo	Blanco	Blanco	Rojo
Compresores de refrigeración u otros gases		Naranja	Blanco	Blanco	Naranja
Cilindros de vapor		Gris oscuro	Blanco	Blanco	Gris oscuro
Transferencia de calor y dieléctricos		Negro	Amarillo	Amarillo	Negro
Motores de combustión interna		Azul oscuro	Blanco	Blanco	Azul oscuro
Caja y diferenciales		Verde esmeralda	Negro	Negro	Verde esmeralda
Transmisiones automáticas		Azul claro	Negro	Negro	Azul claro
	Multipropósitos Alta temperatura Sintéticas Grado alimento	Crema Gris claro Vino tinto Rosa	Negro Negro Blanco Blanco	Negro Negro Blanco Blanco	Crema Gris claro Vino tinto Negro
Lubricantes sólidos		Café	Amarillo	Amarillo	Café
Lubricantes grado alimenticio		Rosa	Negro	Negro	Blanco

### 5.7.1 Diseño típico de un cuarto auxiliar de almacenamiento de lubricantes



- 1 y 6 - Puertas de emergencia y descarga de tambores y equipos.
- 2 - Estructuras metálicas para tambores en posición horizontal.
- 3 - Rejillas para drenaje
- 4 y 5 - Escritorio de control, archivo y programa de lubricación.
- 7 - Armarios y "lockers" para operarios.
- 8 - Tambores para desperdicios lubricantes.
- 9 - Tanques para limpieza de equipos.
- 10 - Equipos de purificación y filtración de aceite
- 11 - Banco de trabajo y herramientas y utensilios de lubricación.
- 12 - Tambores de grasa con bombas
- 13 - Almacenamiento de tanques y recipientes de aceite.
- 14 - Extinguidotes
- 15 - Ventiladores
- 16 - Limpiadores, desengrasantes y productos absorbentes.

## **6) Monitoreo y análisis de lubricantes, herramienta estratégica de confiabilidad en lubricación.**

El monitoreo basado en confiabilidad en lubricantes, es una técnica basada en el análisis de la condición de un equipo, con el objetivo de identificar de manera objetiva y muy temprana el inicio de una posible falla en el mismo. La técnica se apoya en el análisis causa-raíz de una falla, y en pruebas de laboratorio físicas y químicas de un lubricante nuevo, en operación o que ha sido trabajado en una máquina. El análisis y su correcta interpretación, nos proporciona información muy valiosa sobre las condiciones de un equipo y del lubricante en uso.

Puesto que el lubricante, al igual que la sangre en el cuerpo humano, recorre todo el sistema de trabajo en una máquina, puede proporcionar información muy valiosa acerca del estado en que el sistema se encuentra. En los últimos años se ha recopilado información muy valiosa sobre la caracterización y efectos de la variación de las propiedades fisicoquímicas de un aceite nuevo y degradado, del efecto de la contaminación en lubricante-equipos y del mecanismo de desgaste en la máquina, lo que permite predecir con mucha precisión, el estado de “salud” del sistema en operación.

Por otro lado, la tecnología, precisión, sensibilidad y confiabilidad de los equipos analíticos de laboratorio también han evolucionado y permiten en la actualidad, anticiparse o detectar problemas en su etapa temprana para obtener respuestas y tomas de decisiones preventivas de mucho menor complejidad o costo.

El análisis de un sistema tribológico, basado en confiabilidad, consiste primordialmente en los siguientes pasos:

- Análisis global del sistema a analizar: proceso, equipos, partes y condiciones de operación.
- Selección de la maquinaria a analizar: equipos críticos y partes.
- Toma de muestras del lubricante utilizado, en el lugar adecuado y lo más homogénea y precisa posible.
- Análisis del lubricante usado “en sitio” ó en un laboratorio externo.
- Interpretación del análisis realizado. Comparativo contra estándares y con especialistas.
- Reporte gerencial de la condición del sistema, para toma de medidas preventivas o correctivas

De manera global, la información anterior deberá proporcionar en el sistema analizado:

- Estado actual del lubricante.
- Estado de la contaminación del sistema
- Estado y condición de desgaste de la máquina

El mantenimiento de la maquinaria ha pasado por varias fases evolutivas, desde el mantenimiento correctivo hasta el denominado mantenimiento proactivo, que se diferencian principalmente en su enfoque operacional. Estos métodos han pasado de dirigir sus objetivos de no sólo cuidar los componentes de la máquina y el lubricante utilizado, sino en mantener su sanidad operacional centrándose en el servicio y rentabilidad que el equipo proporciona.

La razón fundamental es evidente: los costos de producción de una falla no contemplada, así como los tiempos de respuesta para resolverlos.

Lo anterior, resulta financieramente más rentable, por lo que todas las nuevas filosofías de mantenimiento se dirigen en la actualidad, a maximizar la producción y confiabilidad de la maquinaria bajo esta premisa de “cero defectos” ó “cero fallas no contempladas en un equipo”, es la filosofía central de muchos sistemas de mantenimiento preventivo.

El monitoreo de lubricantes usados en un sistema bajo este enfoque en muchos casos, es mucho más económico, rápido y versátil que otros métodos o sistemas de mantenimiento preventivo o proactivo como el análisis de vibraciones o la termografía en un sistema lubricado.

Se ha detectado que la principal causa de falla en equipos rotativos lubricados es debido a contaminación en el sistema, es la contaminación y esta se puede clasificar en orden de importancia como sigue:

- Partículas sólidas.
- Contaminación con agua.
- Contaminación con aire.
- Oxidación del lubricante y degradación del lubricante
- Variaciones en temperatura del sistema.
- Otros factores secundarios menores como fallas de diseño ó mecánicas.

De manera práctica, se ha detectado que el mantener los lubricantes lo más: “limpios”, “secos” y “fríos” en un equipo, garantiza una vida útil y una eficiencia óptima para la salud de un sistema lubricado.

En el caso particular del análisis del aceite como una herramienta dirigida hacia los fines descritos, ha generado un atractivo muy rentable, cuando se combina con métodos de monitoreo mecánico como los análisis de vibraciones y termografía. Se estima que el mantenimiento programado y la aplicación de programas de monitoreo de lubricantes y de vibraciones, pueden producir reducciones de costos de mantenimiento históricos de más del 100% contra el presupuesto de un mantenimiento de tipo reactivo en una planta de proceso.

El análisis del aceite nuevo, en operación y usado, permite evitar costosas reparaciones en una planta de proceso cuando se implementa de manera profesional.

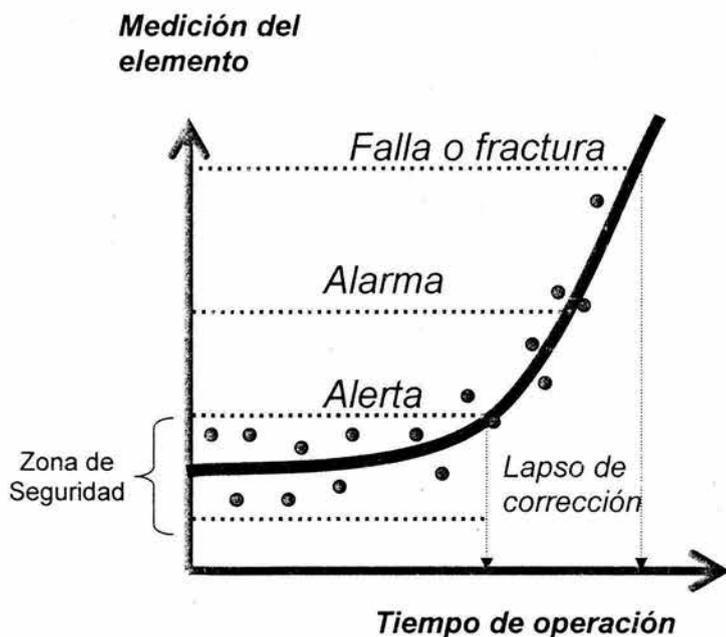
Otro factor básico del monitoreo basado en la confiabilidad de un equipo, consiste en escoger una propiedad física que este relacionada con una causa directa o indirecta de deterioro o desgaste, establecer un estándar de normalidad - anormalidad, y analizar su avance y tendencia.

Los principales métodos de monitoreo utilizados son los siguientes:

- Monitoreo de vibraciones y termografía
- Monitoreo de desgaste
- Monitoreo de variables de operación

El monitoreo y medición de la propiedad física indica la tendencia, alerta y previene al usuario, y genera toma de decisiones mas profundas para encontrar la causa y la planeación de su solución.

Figura 6.1.1 Principio del monitoreo basado en condición, que indica una posible falla en un equipo.



Un ejemplo de gráfica típica para establecer una tendencia de monitoreo basado en la confiabilidad a través del análisis del lubricante, se indica en la figura (6.1.1).

La vida de una máquina, también conocida como vida de fatiga, se define como el número de horas que podrán alcanzar sus componentes mecánicos para garantizar una operación continua, bajo costos programados. Esta vida está basada en las pruebas que los diversos fabricantes establecen de acuerdo a su diseño, materiales y aplicación. Al realizar un análisis de aceite usado, los fabricantes de equipo y de lubricantes, especifican zonas de seguridad de los diversos elementos presentes en una muestra y zonas de alarma o de posibilidad de falla de sistema.

El desgaste de una máquina es multifacético y no hay una manera exacta de definir el fenómeno, sin embargo el análisis de su tendencia, como se ha comentado, permite elaborar curvas tribológicas para cada uno de los elementos metálicos que lo constituyen, las técnicas específicas más importantes para evaluar y monitorear el desgaste son:

- ▶ Espectrofotometría de emisión atómica.- Prueba tradicional que permite analizar las ppm (partes por millón) de cada elemento metálico presente en una muestra de aceite usado.
- ▶ Análisis fisicoquímico del aceite usado.- Se verifican las diferencias entre los componentes del aceite nuevo y el usado y se establecen criterios de cambio ó reacondicionamiento del lubricante.

- ▶ **Conteo de partículas.**- Determina la medición absoluta de las partículas de 2 ppm en adelante presentes en una muestra de lubricante (no especifica tipo de material ), su distribución por mililitro y señala el nivel de “limpieza” del sistema de acuerdo a la norma ISO 4406, 11171 y 11500.
- ▶ **Ferrografía .-** Esta técnica permite medir partículas metálicas del orden de 0.1 a 500 micrones que cubren zonas de desgaste normal y destructivo (partículas de 10 a 100 micrones) y por otro lado, por medio del microscopio identifica forma, tamaño, tipo de desgaste y su origen.

Estas técnicas se aplican en función de:

- ✓ Tipo de máquina y mecanismo.
- ✓ Condiciones de operación.
- ✓ Criticidad del equipo y mecanismo.

El número y frecuencia de las pruebas efectuadas en un equipo, también están en función de los factores señalados. La toma de muestra de un aceite usado en un equipo es fundamental para la identificación objetiva del desgaste, el estado fisicoquímico del lubricante y requiere de entrenamiento y técnicas establecidas para cada equipo (1,21), de la calidad y técnica utilizada en una toma de muestra de un aceite en un equipo depende su interpretación. El contenido de metales y elementos no metálicos presentes en una muestra de aceite nuevo y usado, dependen del tipo de mecanismo lubricado, su metalografía y la formulación del lubricante utilizado. Cuando el análisis de los componentes y su tendencia “caen” de manera periódica (según su periodo de cambio o de muestreo establecido) fuera del rango establecido para el equipo y el lubricante aplicados, y esta indica una tendencia ascendente o descendente, es señal inequívoca de desgaste, deterioro del lubricante o de contaminación del mismo.

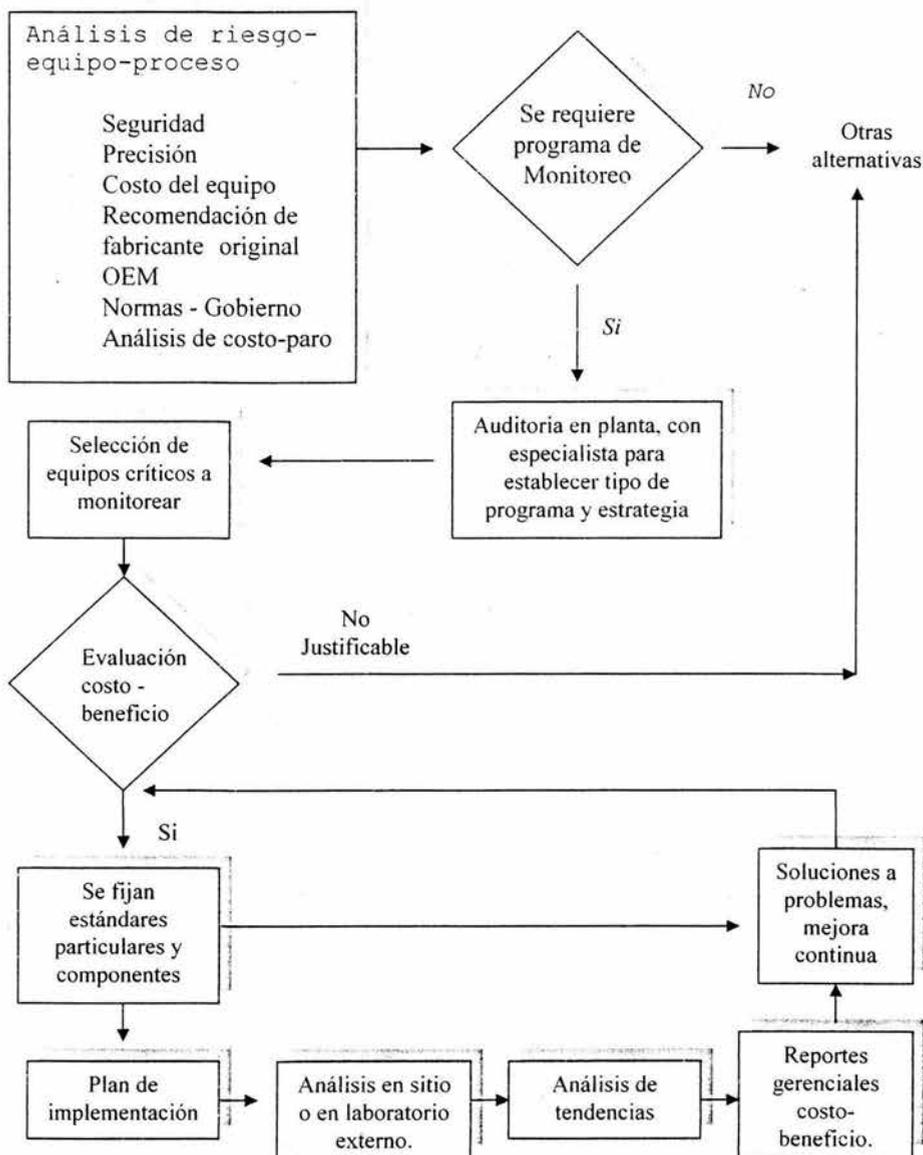
Cada técnica tiene sus ventajas y limitaciones, por ejemplo la espectrofotometría no permite la detección de partículas mayores a 10 micrones ni en número ni en forma. Esta técnica se combina con el análisis fisicoquímico del lubricante y dependiendo del equipo y las condiciones de servicio, se aplican las técnicas de conteo de partículas y la ferrografía.

Cada fabricante debe de determinar los límites de desgaste de sus equipos, cuando esto no es posible o no existe información, esta se determina con base a criterios establecidos de tendencia de desgaste entre parámetros del aceite y componentes nuevos y en uso.

Las técnicas anteriormente señaladas de análisis del aceite nuevo y usado, combinadas con técnicas de monitoreo mecánicas como el análisis de vibraciones y la termografía, complementan en la actualidad los nuevos programas de confiabilidad operacional de equipos críticos como sistemas hidráulicos, turbocompresores, turborreactores y turbinas.

Cada día, la aplicación y la necesidad de establecer técnicas apropiadas de monitoreo de un equipo, adquiere una importancia estratégica en una planta de proceso o en un equipo automotriz, ya que esta asociada a obtener menores costos de operación y mayor confiabilidad y rentabilidad operativa. Las direcciones corporativas de grandes empresa en las industrias de minería, cemento, acero, equipo automotriz pesado, aviación y marítima, incluyen ya en sus planes productivos dichas técnicas. En países como Estados Unidos, Inglaterra, Francia, Alemania y Japón el crecimiento y aplicación de estas técnicas ha mostrado un desarrollo extraordinario en los últimos diez años (12). México no será la excepción y requerirá de formar profesionales y especialistas en esta materia en el corto plazo.

**6.1.2 Procedimiento para establecer un programa de monitoreo continuo en una planta de proceso.**



## 7) Tribología, Lubricación y Ecología.

Hoy en día la contaminación ambiental y en particular el problema del desecho de los aceites lubricantes usados, se ha tornado en un punto crítico en el panorama industrial, social, económico y ecológico en nuestro país y el mundo desarrollado.

El crecimiento de la población en las principales áreas urbanas e industriales, ha llevado a las autoridades, a recapacitar en la necesidad de estudiar los sistemas factibles de recuperación de los recursos naturales como el aire, agua, tierra y petróleo.

En el caso particular de los aceites lubricantes usados, estos se definen como “ aceites sometidos a usos industriales que por envejecimiento e impurezas”, no son adecuados para aplicaciones posteriores como aceites lubricantes., a menos que sean tratados posteriormente para su reutilización. Sin embargo, la falta de educación y capacitación, malos hábitos, falta de recursos económicos para el tratamiento final, han llevado al desecho indiscriminado de lubricantes usados en las líneas de desagüe, cañerías y a “cielo abierto”, o como aceites usados “baratos” en aplicaciones menores, lo anterior ha generado una serie de problemas económicos y ecológicos en “cascada”, de los cuales destaca la contaminación de mantos acuíferos naturales, además de complicar el tratamiento final de aguas de drenaje con posibilidades de recuperación para su reutilización.

El problema básico es la tendencia natural de los lubricantes y aceites a la formación de emulsiones lubricante - agua., que provocan la inutilidad del agua susceptible de ser tratada por medios económicos y sencillos, esto genera que volúmenes de agua con posibilidades de regeneración, disminuyan tremendamente, existiendo el peligro de crear un desequilibrio ecológico motivado por el aumento exponencial de aceites usados en los últimos 50 años; aunado a lo anterior, los costos de los sistemas de purificación y regeneración de las plantas de tratamiento convencionales se incrementan tremendamente ante la presencia de los lubricantes emulsionados en agua.(25)

Ante la necesidad de optimizar los recursos naturales y económicos, se están tomando medidas preventivas basadas en programas de educación y manejo de residuos como los siguientes:

- Evaluar tecnologías viables de regeneración y reciclaje de los lubricantes usados, vía refinación y tratamiento fisicoquímico.
- Establecer campañas de educación al público y consumidores industriales, para evitar el desecho de lubricantes en cañerías y a “cielo abierto”.
- Establecer lugares específicos de concentración y almacenaje de lubricantes usados.
- Fomentar la creación de empresas ecológicas dedicadas al tratamiento de aceites usados.
- Fomentar la búsqueda de productos de mayor resistencia o vida en la maquinaria
- Fomentar la incineración de los lubricantes usados en procesos de combustión no contaminantes.
- Buscar tecnologías alternativas de ahorro de energéticos utilizando lubricantes usados.

En México y en Latinoamérica el problema se acentúa aún más, debido a las crisis financieras, hábitos de corrupción y a la falta de educación para la toma de conciencia ecológica a todos niveles., a continuación se presenta un estimado del destino final del total de los aproximadamente 700 millones de toneladas anuales de lubricantes generadas en el mercado mexicano de lubricantes a finales del año 2000. ( 13, 22, 23)

Se estima que un promedio del 90% de la cantidad anterior, es decir aproximadamente 630 millones de toneladas de aceites residuales, no se conoce su destino final, se sabe que dichos productos se queman, se tiran en cañerías, al cielo abierto, a ríos y mares, es decir no se controlan su tratamiento y destino final. Lo anterior nos lleva a la conclusión de la urgencia en acelerar los sistemas, métodos, leyes, etc., que impidan el crecimiento y permitan el control adecuado de este problema, ya que como hemos señalado, el costo de la factura que los seres humanos debemos de pagar es inestimable y no tienen precio

#### Métodos de tratamiento y desecho de lubricantes usados

Fuente de desecho o tratamiento	Porcentaje
Combustión vehicular	15 %
Quema de ladrilleras	31 %
Regeneración en plantas	1 %
Rerefinación	5 %
No precisado	48 %

Hoy en día se esta exigiendo que los lubricantes sean “biodegradables”. ¿ Que significa esto ? Si por biodegradabilidad se entiende como la capacidad que tiene una sustancia ser degradada por microorganismos, entonces un aceite lubricante ha de degradarse hasta un porcentaje residual por vías naturales y en el transcurso de un lapso determinado.

La biodegradabilidad es siempre correlativa a los microorganismos ( bacterias y protozoos ), que transforman al aceite lubricante en Bióxido de Carbono y Agua, por ejemplo en aguas naturales y bosques., en sustancias inocuas que no afectan al equilibrio natural., bajo tales condiciones, éstos productos se pueden degradar biológicamente., este comportamiento se caracteriza en primer lugar en los productos cuyas sustancias básicas ( materias primas ) son similares a las existentes en la naturaleza.

Lo anterior lleva a cambiar el punto de vista del desarrollo tecnológico de fabricar materias primas resistentes a la naturaleza, en un futuro próximo se buscará el desarrollo de materia primas susceptibles de degradarse naturalmente, evitando el uso de productos químicamente resistente a los degradadores naturales.

En la actualidad la producción de aceites especiales biodegradables, sintéticos y ciertos compuestos minerales perfectamente refinados, están proporcionando rendimientos extraordinarios cuando se seleccionan pertinentemente, en muchos caso el costo e inversión por unidad de estos productos, puede ser un obstáculo para su utilización, sin embargo en la gran mayoría de los casos, la evaluación debe de realizarse a largo plazo y en función de un análisis costo beneficio, sin embargo, el criterio de selección de la utilización de un aceite lubricante biodegradable, estará fundamentado cada vez más en sus bondades hacia el medio ambiente y los ecosistemas.

No hay lugar a dudas que la mejor protección del medio ambiente se logra cuando reconocemos que el problema de la contaminación es un problema de conciencia personal, y un problema de educación integral.

En el momento de que el ser humano sea consciente de los daños ocasionados a la naturaleza y que de la actitud que tome dependerá nuestra existencia, la esperanza es que se desarrolle un cambio de estructura mental, hacia el uso racional de productos, tecnologías, educación y filosofía de vida, el requisito para dicho cambio es la educación e información desde una temprana edad, para romper los hábitos y costumbres que nos han llevado al desequilibrio ecológico actual, el cual aún es susceptible de controlar si se actúa con decisión y prontitud, de otra forma los daños estimado serán incalculables y no reversibles.

Hasta hace algunos años, la lubricación como factor vital del desarrollo industrial y doméstico, se había enfocado desde la Tribología, analizar los problemas de lubricación, desde un punto de su optimización química y mecánica, con el objetivo primordial para reducir la fricción y el desgaste. Los lubricantes son productos, en su gran mayoría, derivados del petróleo, que bajo ciertas condiciones de servicio, tienen una vida útil y posteriormente, se eliminan ó reprocessan para otras aplicaciones. Antes de la era de petróleo hacia los años 1850, todos los lubricantes eran completamente inocuos y biodegradables al medio ambiente y a los seres humanos, ya que sus bases o materias primas eran completamente de origen animal y vegetal.

Con el desarrollo de la industria petroquímica, grandes cantidades de aceites bases y aditivos químicos para la producción de lubricantes industriales, se presentaron en escena, amparados por su facilidad de obtención, resistencia y economía. Irónicamente el petróleo, al cual es necesario sacarlo de ámbito natural dentro de la tierra para convertirlo en una parte en lubricante, puede resultar un enemigo potencial para el medio ambiente, cuando se le trata de regresar a ella.

A la par con el avance de la petroquímica, los avances en el terreno de la ecología, han llevado a los científicos y técnicos en ecología, a evaluar los efectos colaterales de los productos derivados del petróleo en la naturaleza. De acuerdo con un reporte presentado en un Congreso Mundial de Tribología en Londres en Septiembre de 1997., sobre los efectos de los aceites lubricantes al medio ( STLE- Julio 1998)., el consumo anual de lubricantes asciende a aproximadamente 40,000 Kilotones, 60% de los cuales son provenientes de motores de combustión interna, algunos de éstos lubricantes son quemados durante su uso, algunos se pierden y tiran al medio ambiente y el resto se recupera o reprocessa. Se estima que entre un 20 y 30% sólo se recupera y entre 15 y 35% se tira al medio ambiente de manera desconocida.

No obstante de existir estudios científicos sobre la materia desde hace más de 50 años, no es sino hasta la década de los años 80's y posteriormente al accidente del Buque Petrolero Exxon Valdes, cuando las autoridades en los Estados Unidos, retoman el tema y se inicia un nuevo rumbo sobre los estudios y consideraciones de los efectos ecológicos de los aceites lubricantes usados, que son desechados al medio ambiente sin control.

Se ha encontrado que los aceites derivados del petróleo, contienen compuestos que pueden contaminar efluentes naturales por un período de cien años, inhibiendo el crecimiento equilibrado del ecosistema vegetal y animal. Estudios recientes han de mostrado que, cantidades como 0.1 ppm de aceites usados del petróleo de origen mineral presentes en el agua de mar, inhiben en un 20 % la reproducción natural del camarón (14, 13).

Por otro lado, el de agua contaminada con aceites y grasas en las cañerías y vertederos, se vuelve altamente costoso para los Gobiernos y Sociedad cuando se pretende realizar procesos

de tratamiento o reutilización, lo anterior aunado al resto de contaminantes industriales desechados sin control en la actualidad, han llevado al análisis y búsqueda de soluciones con menor riesgo y costo para el hombre.

La alternativa es regresar la búsqueda de productos lubricantes del tipo biodegradables, de origen vegetal como en la antigüedad. Si la biodegradabilidad, es la habilidad de una sustancia para ser descompuesta por microorganismos, en el caso de los lubricantes, el problema se concentra en la velocidad y toxicidad con que los componentes de los lubricantes usados, realizan esta operación sin peligro al hombre ni al medio.

Los principales organismos internacionales de cuidado al medio ambiente como la EPA en los Estados Unidos, están trabajando para establecer pruebas y estándares de biodegradabilidad en lubricación, aunque no existen aún pruebas universalmente aceptadas, existen pruebas alternativas para determinar el grado de biodegradabilidad de un lubricante, los tres métodos más comunes son: CEL L 33T82, EPA 560/6-82-003 y la serie de pruebas OECD 301. Por otra parte estas pruebas deben de ser evaluarse en conjunto con pruebas de toxicidad, ya que un compuesto puede ser biodegradable en un lapso determinado (35 a 40 días máximo), pero puede contener compuestos tóxicos., en este sentido existen dos pruebas básicas para evaluar la toxicidad de un lubricante y no sólo su biodegradabilidad, la prueba Microtox y la prueba Rainbow, se puede encontrar mayor información en (30).

En la actualidad, las grandes petroleras en el mundo, están apoyándose en estudios de Universidades, Organismos Especializados y Gobiernos, para desarrollar métodos específicos con el fin de obtener productos, formulaciones y estándares, para elaborar materiales no dañinos al medio ambiente.

De manera general la STLE, ha recomendado a los usuarios de lubricantes, seguir los siguientes criterios en lubricación, para controlar un posible impacto al medio ambiente:

- ◆ Utilizar lubricantes más resistentes a la oxidación, con el fin de extender su vida útil y minimizar su desecho
- ◆ Utilizar lubricantes con aceites bases y aditivos lo menos dañinos al ser humano y medio ambiente
- ◆ Utilizar lubricantes con más posibilidades de reproceso o limpieza
- ◆ Utilizar lubricantes con aditivos y aceites base, más resistentes para las condiciones de operación.
- ◆ Establecer sistemas que permitan automatizar y minimizar el consumo de lubricante en un proceso o máquina.
- ◆ Evaluar la posibilidad de aplicar lubricantes con biodegradabilidad menor a 30 días, sin perjuicio de su protección mecánica y de costo accesible.
- ◆ Establecer programas de calidad en mantenimiento y monitoreo de aceites usados para evaluar su eficiencia y extensión de vida.

La lucha contra el tiempo es crítica y se estima que durante la primera década del siglo venidero, se establecerán las bases tecnológicas para la determinación y regulación de lubricantes dañinos al medio ambiente peligrosidad y la caracterización de las propiedades biodegradables de los lubricantes comercialmente usados en el la industria y transporte.

Los países del bloque más poderoso del mundo, están en la actualidad, estableciendo bases para regular y combatir esta problemática mundial. Uno de los lineamientos internacionales de

ecología, esta limitando el uso de solventes clorinados, eliminando el Plomo y el Bario en compuestos lubricantes y reduciendo los niveles de Fenol en los aceites naturales derivados del petróleo, a menos de 2 ppm en sus componentes.( 17, 21).

Los procesos petroquímicos de obtención de aceites base minerales derivados del petróleo, son cada vez más controlados y limpios, generando compuestos y desechos de proceso, cada vez con menores riesgos para la salud. Las grandes empresas petroleras y fabricantes de lubricantes automotrices e industriales, han establecido programas ecológicos en los procesos de producción y de producto terminado, cuyo objetivo primordial será el establecer normas y reglas para controlar y limitar el uso de materias primas y productos lubricantes considerados como dañinos al hombre y medio ambiente.

En los próximos años se estima que existirá un desarrollo acelerado de tecnologías ecológicas en la fabricación de productos lubricantes, que afectará los productos y procedimientos tradicionalmente utilizados en los últimos cincuenta años.

### **8) Perspectiva de la Tribología y la Ingeniería de Lubricación en México hacia el presente siglo.**

Con el desarrollo industrial cada día más veloz y demandante de alternativas tecnológicas de proporcionen mayor eficiencia y cuidado energético y ecológico, las ciencias, pensamientos, energía, recursos de los científicos, técnicos, industriales y gobiernos en el mundo, estarán, de una manera u otra, estarán ligados al terreno de nuevas ciencias como la tribología, por su importancia estratégica para el buen desarrollo del presente y del futuro de una sociedad industrializada.

En el año 2002, con la creación de la Sociedad de Tribologistas e Ingenieros de Lubricación Capítulo-México, se inicia una pequeña célula que viene a impulsar la difusión cooperación de técnicos y expertos en el terreno de la fricción, desgaste y la lubricación, con el fin de compartir experiencias, conocimientos conceptuales, prácticos y científicos en el campo de la tribología y al lubricación.

En las últimas décadas el estudio de la tribología ha tenido un desempeño espectacular en los países del primer mundo, ya que se ha reconocido como una fuente potencial de ahorro y economía de recursos energéticos, humanos y financieros, en este sentido se proyecta un crecimiento en la demanda de profesionales, científicos, profesores e investigadores en los fenómenos de fricción y desgaste. Las grandes Universidades en los Estados Unidos, Inglaterra, Francia, Alemania y Japón, están realizando Congresos, Foros, Programas, Cursos, etc., donde se involucran trabajos relacionados con fenómenos tribológicos. Lo anterior se confirma con el incremento de cátedras Universitarias de Tribología y los programas y medidas aplicadas por los países señalados., donde se han impulsados la creación de grupos de trabajo, desarrollo de investigaciones, evaluación y adaptación de tecnologías tribológicas y la creación de centros tecnológicos de investigación en Tribología.

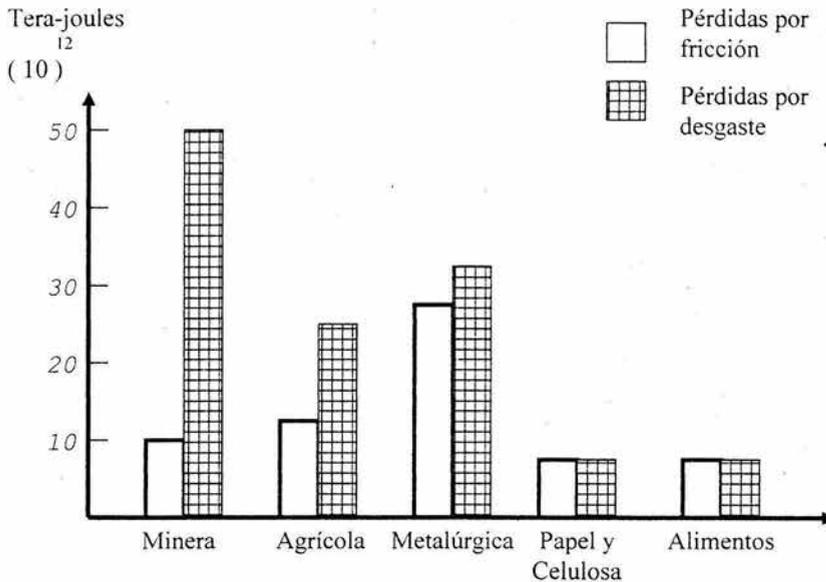
Los Estados Unidos de Norteamérica, el Ministerio de Energía, en un informe estratégico de desarrollo económico y tecnológico presentado en 1995, se estableció el desarrollo e investigación tecnológica en seis ramas básicas: La corrosión, tecnología y desarrollo de nuevos materiales, diagnóstico y control de maquinaria, metalurgia de polvos y la Tribología. En 1994, la Organización Nacional de la Ciencia, destacó a la tribología como una de las cuatro disciplinas fundamentales de la construcción de maquinaria, debido a que los fenómenos y pares de fricción están presentes en todos los sistemas mecánicos.

En las áreas de la Industria y del transporte se estimaron las pérdidas debidas a problemas tribológicos de fricción y desgaste acelerado obteniéndose los resultados en la gráfica 8.1.

En el sector transporte se estimó que más de un 26% de las pérdidas de consumo energético se debieron a factores tribológicos, éstas se debieron fundamentalmente a problemas de lubricantes, frenado, mecanismos de distribución del movimiento y de sus principales elementos en el motor ( cilindros, pistones, etc.).

Si analizamos detenidamente, son de suma importancia para al economía de un país, el estimar las pedidas energéticas derivadas de fenómenos tribológicos, ya que esto esta ligado directamente con su eficiencia económica e industrial.

**Figura 8.1 Pérdidas por fricción y desgaste en áreas de investigación industrial.**



En China hacia 1990, se desarrolló un gran avance en el terreno de la tribología, destacándose la creación del centro Tribológico de la Sociedad de Ingenieros Mecánicos, desarrollando un foro internacional sobre "La tribología y sus posibilidades", donde fueron presentados resultados en la investigación de fenómenos de lubricación, hidromecánica, mecanismos de

desgaste, fricción en diversos materiales, nuevas tecnologías de cojinetes y rodamientos, entre otros.

En la caso de la Ex – Unión Soviética, fue el país que más impulsó el desarrollo de la tribología en sus inicios y fue la responsable de editar los primeros libros científicos teóricos sobre el tema, que posteriormente pasaron a ser base del acervo científico de la Tribología en Inglaterra, los Estados Unidos y Alemania. Otro país que destaca en el panorama de la Tribología es Polonia, con nombres de científicos renombrados en el terreno del diseño de maquinas para medir fenómenos de fricción y desgaste (13)

Sin duda alguna, el campo de desarrollo de la Tribología avanza a grandes pasos y el futuro para realizar trabajos científicos y tecnológicos, así como el de desarrollo y demanda de profesionales, técnicos y profesionales, presenta un panorama halagador en un cercano plazo.

En el caso de México y Latinoamérica, no se han dado pasos formales en el estudio de la Tribología como lo han realizado los Estados Unidos, Canadá o las economías avanzadas en Europa y Asia.

Se va a requerir un gran esfuerzo por parte de las Instituciones de Educación Universitaria como la nuestra, para fomentar el estudio y creación de programas, seminarios, cursos a todo nivel sobre esta ciencia, por un lado para actualizar y acercar a los profesionales en México, por la importancia estratégica de esta nueva ciencia, se sugieren realizar las siguientes acciones:

- Proyectar un censo de las pérdidas en la industria y el transporte, debida a los fenómenos de fricción y desgaste no controlado y su impacto en la economía.
- Presentar dichos estudios y estadísticas a las autoridades, resaltando el impacto económico generado y la importancia de apoyar el desarrollo e investigación en Tribología.
- Realizar un censo de las Universidades e Instituciones de Investigación y Educación Profesional y técnica, donde se realicen estudios sobre fenómenos de fricción y desgaste, lubricación o en temas desarrollados por esta ciencia.
- Realizar un censo de los profesionales y científicos que actualmente realizan estudios e investigación en la materia, tanto de la empresa privada como de académicos universitarios y técnicos.
- Registrar a todos los profesionales en la materia en la sociedad de Tribólogos e Ingenieros de Lubricación en México y los Estados Unidos.
- Realizar un Foro Científico y Tecnológico sobre el tema, con un enfoque sobre la transferencia tecnológica de esta nueva ciencia, de su importancia en la economía y desarrollo de la ingeniería y la industria de nuestro país.
- Proyectar la creación de áreas y centros de desarrollo científico y de investigación teórica y aplicada, donde se estudien y discutan fenómenos y problemas relativos al campo de la Tribología.
- Introducir y justificar la importancia del estudio y la investigación de esta materia, como parte formativa de los profesionales de la ingeniería.
- Realizar seminarios y cursos a nivel estudiantil, licenciatura y de especialidad sobre el tema para fomentar el desarrollo de profesionales especialistas en Tribología.
- Realizar y difundir en la industria la importancia y rentabilidad de contratar profesionales con conocimientos y estrategias de confiabilidad tribológica.

Dado que la Tribología se ha convertido en una de las ramas científico-técnicas más importantes en la actualidad, su estudio será cada vez más trascendente e importante en nuestra comunidad, ya que es sinónimo de vida útil, confiabilidad y ahorro energético en una sociedad industrializada. No se duda entonces, que el estudio de nuevas ciencias teórico-prácticas y multidisciplinarias, como la Tribología, representen un campo fértil de progreso trabajo para los profesionales dedicados a su estudio

## **I) Conclusiones**

- 1) El estudio de nuevas ciencias como la Tribología es fundamental para el desarrollo de una sociedad industrializada, su aportación no solo abarca los aspectos técnicos del fenómeno de la fricción, el desgaste y la lubricación, sino que, al ser una ciencia multidisciplinaria, brinda diversos enfoques para la resolución de problemas prácticos de fenómenos de superficie, como lo son la fricción, el desgaste y la lubricación.
- 2) Los fenómenos de fricción, desgaste y lubricación, están íntimamente ligados con los principios fundamentales de la Química, Física y Físicoquímica y sus aplicaciones prácticas en el terreno industrial. Los modelos y sistemas para la búsqueda de soluciones en Tribología, permiten aplicar de manera racional estos fundamentos, por lo que se recomienda el estudio y evaluación teórico-práctica de los mismos.
- 3) Los aceites lubricantes constituyen una parte integrante del diseño, construcción, y el funcionamiento de toda maquinaria, no deben catalogarse como un producto complementario o ajeno a ésta.
- 4) En la selección adecuada de un aceite o grasa lubricante, deberán evaluarse siempre los parámetros físicoquímicos del mismo a fin de adecuar el más apropiado. La eficiencia, productividad aportada por un lubricante, está íntimamente ligada a sus propiedades moleculares y físicoquímicas, de ahí la importancia de su estudio y análisis racional.
- 5) La propiedad más importante en un lubricante y su selección es la viscosidad, por lo que los factores que influyen en su comportamiento tales como la temperatura, carga y velocidad, se deberán tomar en cuenta en el cálculo del rendimiento y operación de la máquina.
- 6) No existe un modelo de validez universal, donde se tengan en cuenta todos los factores de influencia relevantes en un problema de lubricación en el campo. Las normas y estándares internacionales, siempre servirán de base para la adecuada selección del producto.
- 7) La solución de los problemas de gestión, almacenamiento y manejo de residuos de aceites lubricantes usados, ha de ser siempre un criterio de selección del producto más óptimo.
- 8) El campo de aplicación de los aceites sintéticos en el futuro irá en aumento, debido a las ventajas técnico - económicas y ecológicas de los mismos.
- 9) No se debe seleccionar un aceite lubricante en base a su costo o precio de venta, a la larga el cambio de calidad por "precio", sino por su calidad y beneficios, la experiencia ha demostrado siempre que en el campo de la lubricación, sacrificar calidad por precio, es una decisión no rentable.
- 10) Se recomienda capacitar al personal de mantenimiento en los principios de la lubricación y la correcta selección de un lubricante, la gran mayoría de los problemas de rendimiento que se

presentan en este campo, son errores humanos debidos a la ignorancia, falta de capacitación del personal encargado de la lubricación.

11) La selección y aplicación de un lubricante de tipo industrial, la debe de realizar personal técnico y profesional capacitado para tal fin, evitando en lo posible toma de decisiones de lubricación en manos de personal no apto técnicamente.

12) En la elaboración de un programa de lubricación profesional se deben de involucrar personal gerencial, principalmente de las áreas de producción, mantenimiento y deberá de estar asesorado por especialistas o proveedores confiables expertos en el ramo.

13) Un programa de confiabilidad de maquinaria rotativa deberá de incluir un área de lubricación así como una estrategias de análisis de laboratorio de lubricantes (aceites nuevos y usados) en particular cuando se operen equipos críticos.

14) Los profesionales de la ingeniería química dedicados a la administración de la producción y al desarrollo o búsqueda de tecnológicas para hacer más eficientes los procesos de producción y de transformación industrial, deberán de tomar en cuenta las pruebas y conocimientos aportados por nuevas ciencias como la Tribología.

15) Se sugiere establecer programas de difusión para crear lazos entre el conocimiento de la fisicoquímica de superficies, la tribología y su aplicación a la solución de grandes problemas nacionales como los es el ahorro de energía, su impacto en la economía y el cuidado ambiental.

16) Se recomienda insertar en los programas de los profesionales de la química dedicados la desarrollo de tecnologías alternativas en el campo de la fisicoquímica aplicada, investigar los últimos avances y desarrollo de materiales y aditivos en el terreno de la lubricación especializada.

17) Se recomienda sensibilizar a los profesionales de la química, (ya que todos de una manera u otra estarán ligados a la lubricación industrial), en las diversas alternativas que existen para el tratamiento, confinamiento y uso de los lubricantes nuevos y usados que utilicen en una planta de proceso, con el objetivo de crear un cadena ecológica que minimice los efectos de contaminación y mal uso de los lubricantes nuevos y usados en una planta de proceso.

18) Es conveniente que el usuario de aceites lubricantes, aprovechen las experiencias de aplicación de los aceites sintéticos o de alto rendimiento, por medio del asesoramiento técnico de expertos.

19) Se recomienda en México la implantación de programas ecológicos de educación, para el manejo y disposición de los lubricantes usados tanto a autoridades, fabricantes y usuarios, así como el fomento de empresas dedicadas a tal fin.

20) Se recomienda que los profesionales de la química dedicados al mantenimiento y producción, compartan experiencias de trabajo con organismos internacionales peritos en el tema como la Sociedad de Tribologistas e Ingenieros de Lubricación en México, con el fin de establecer estándares de calidad, rendimiento, alternativas de aplicación, desarrollo de nuevos productos y tecnologías, etc., dirigidos a la formación de profesionales, asesoría técnica a fabricantes y usuarios, pero fundamentalmente a la búsqueda de la optimización técnico - económica y ecológica de los aceites lubricantes en nuestro país.

## II) Bibliografía:

- 1) Tribología y Lubricación Industrial y Automotriz  
Tomo 1, 2a. Edición 1993.  
Aut: Pedro Albarracín Aguillón  
Ingeniero Mecánico- Universidad de Antioquía.  
Facultad de Ingeniería Mecánica  
Universidad Nacional de Colombia
- 2) Principles and Applications of Tribology  
International Science and Technology – Volume 14  
Pergamon Press 1975. First Edition  
Aut: Desmond F. More  
University College, Dublin and Director
- 3) Tribology: Science of Combating Wear  
Parts 1 –10 – Back to Basic  
1991-STLE- Technical Bulletin  
Aut: William A. Glaeser, Richard C. Ericson, Jerrol W. Kannel  
STLE-Park Ride, Illinois., E.U.
- 4) Basic Lubrication Course  
STLE Education Course 1998  
Aut: Walter E. Huysman- Chairman  
STLE-Park Ride, Illinois., E.U.
- 5) ICI Specialty Products  
1985 Tribol Product Manual  
High Performance Lubricants  
World Headquarters  
ICI Americas INC. California E.U.
- 6) SKF  
Gama popular de rodamientos  
Boletín Técnico- Catálogo 4007  
Copyright SKF 1996  
Dinamarca
- 7) Mobil Oil de México SA de CV  
Programa Industrial de capacitación  
Aut. Pedro Cruz M.  
México 1990.

- 8) Mobil Synthetic Lubricants  
Mobil Oil Corporation  
Marketing and Refining Division- International Manager  
1985 - Mobil Oil Corporation-Technical Bulletin
- 9) Manual de Transmisión de Potencia  
Power Transmission Distributors Association  
Comité de Recursos Educativos de la PTDA E.U.  
Penton Cistom Publishing Group  
1998 – 1ª Ed. Cleveland Ohio
- 10) Manual de lubricación  
Tomo 1 y 2 ., 2ª. Edición 1993  
Ing. Guillermo Valencia Andrade  
Editorial del Toro SA de CV– México DF
- 11) Lubricating Greases  
Clasification, Selection and Application  
Kluber Publication Munchen  
Technical Bulletin - 1990
- 12) Lubes & Greases  
The Magazine of Industry in Motion  
LNG Publishing Company INC.  
6105G-Arlington Blvd., VA 2204 USA  
October 2000
- 13) Hart's - Lubricants World  
Hart's Publications INC.  
4545 Post Oak Place, Suite 210  
Houston, TX., 77027 USA  
Vol 8.No.5 – May 1998
- 14) Lubrication Engineering  
Journal of the Society of Tribologists and Lubrication Engineers  
STLE-Park Ride, Illinois., E.U.  
Vol.54., No.6
- 15) Castrol Industrial North America  
Performance Lubricants Division  
General Reference Guide  
Lubrication Technology  
1001 West 31 Street  
Downwers Grove,IL 60515  
January 1996.

16) La Tribología, Ciencia y técnica para el mantenimiento  
Francisco Martínez Pérez  
2ª.edición, Editorial Limusa  
México, 2001

17) The Tribology Handbook  
Second edition  
Michael J.Neale  
Butterworth-Heinemann  
England,1999

18) The Lubrication Engineers Manual.  
Second Edition  
AISE ( Association of Iron and Steel Engineers)  
USA - 1999

19) Handbook of Friction Units Machines  
I.V. Kragelskii and N.M. Mikin  
Second Edition  
ASME PRESS, New York, 1988

20) Society and Tribologists and Lubrication Engineers  
General Information Bulletin  
STLE, Park Ride, Illinois, 2000

21) Interpretación del análisis de aceite  
Ing. Gerardo Trujillo  
Manual del curso, 1ª ed.  
Noria Latinoamericana  
2001, México

22) Mantenimiento Productivo  
Revista año I, No.3, Jun-Jul., 2002  
México

23) Aplicación de la metodología del mantenimiento productivo total TPM  
Universidad Iberoamericana, México., 2001  
Trabajo sobre ponencia en Ingeniería Mecánica.  
Ing. Daniel Vargas Bustamante.

24) Grasas Lubricantes.  
Clasificación, aplicación y selección  
KLUBER LUBRICACION MEXICANA  
10ª Edición., México., Kluber Inc.

25) Contamination Control and Filtration Fundamentals

Pall Industrial Hydraulics Company

Glen Cove, New York., 1995

2a ed.

26) Molikote

Rudolf Zechel

Peter Lonsky

Dow Corning Corporation

1991 English Edition, -Dow Corning Pub.

Great Britain

27) Ready Reference for Lubricants and Fuel Performance

Lubrizol Corporation

Lubrizol Edit., 2002

Lakeland Boulevard, Wickliffe, Ohio

28) Desgaste de Metales

A.D. Sarkar – ( Trad.-Maria Cristina Saguines Franchini)

Noriega Editores, Editorial Limusa

1a. edición., México 1990.

29) Principles and Applications of Tribology

Bharat Bhushan

Wiley Interscience Pub.

John Wiley and Sons

1999, 1a edit.

30) Lubrication Engineering

Journal of the Society of Tribologists and Lubrication Engineers

STLE-Park Ridge, Illinois., E.U.

Vol.54., No.7

Biodegradable Lubricants for Eco-compatible applications.