

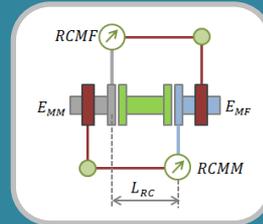
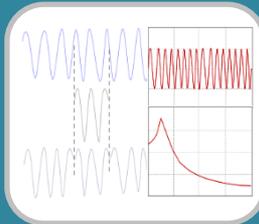
ICI

MÁSTER DE MANTENIMIENTO DE MÁQUINAS

DEMO DEL CONTENIDO TEÓRICO DEL MÁSTER DE MANTENIMIENTO DE MÁQUINAS



DE LOS CONCEPTOS...



...A LA APLICACIÓN PRÁCTICA

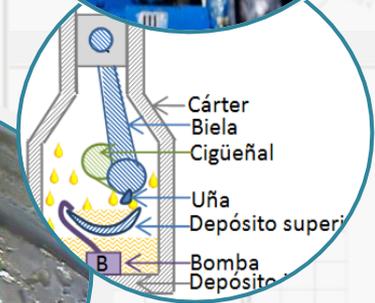
Se presentan a continuación algunas partes de varios temas de los que conforman este master de MANTENIMIENTO DE MÁQUINAS (174 páginas de un total de 2.466), a título de ejemplo, para que los posibles interesados en cursarlo conozcan la forma en que se presenta y desarrolla el mismo antes de tomar la decisión final

Icl

MÁSTER DE MANTENIMIENTO DE MÁQUINAS

MÓDULO 1

Tribología aplicada al mantenimiento de máquinas



TEMA 3

LUBRICANTES EMPLEADOS EN LAS MÁQUINAS

PREÁMBULO

Este tema denominado LUBRICANTES EMPLEADOS EN LAS MÁQUINAS es el tercero de los cinco temas de los que consta el Módulo 1 TRIBOLOGÍA APLICADA AL MANTENIMIENTO DE MÁQUINAS del Master en MANTENIMIENTO DE MÁQUINAS y se enmarca dentro de su primer bloque CONCEPTOS PREVIOS en el contexto de lograr una progresividad en el aprendizaje.

El tema consta de 6 partes:

- En la primera parte se expone unas generalidades sobre los lubricantes (definición, composición, origen, clasificación, etc.).
- En la segunda parte se realiza un estudio en profundidad de los lubricantes líquidos o aceites, tanto naturales como sintéticos (como se genera, sus propiedades, los aditivos, sus aplicaciones, sus normativas, etc.).
- En la tercera parte se realiza un estudio en profundidad sobre los lubricantes pastosos o grasas , tanto naturales como sintéticas (como se generan, propiedades, aditivos, aplicaciones, normalizaciones, etc.).
- En el cuarto tema se realiza un estudio en profundidad de los lubricantes sólidos, tanto inorgánicos como orgánicos (clasificación, propiedades, aplicaciones, etc.).
- En la quinta parte se realizan una serie de consideraciones relativas a la selección del lubricante mas adecuado para cada aplicación.
- Finalmente en la sexta parte se exponen algunos ejemplos de aplicación de los lubricantes a máquinas concretas y significativas.

1. GENERALIDADES SOBRE LOS LUBRICANTES

- 1.1. Definición de lubricante.
- 1.2. Funciones de los lubricantes.
- 1.3. Composición de los lubricantes.
- 1.4. Origen de los lubricantes. (Naturales, sintéticos y semisintéticos).
- 1.5. Clasificación de los lubricantes atendiendo a su estado físico. (Líquido, pastoso, sólido y gaseoso).

2. ESTUDIO GENERAL DE LOS LUBRICANTES LÍQUIDOS

- 2.1. Introducción al estudio de los lubricantes líquidos.
 - 2.1.1. Definición de los lubricantes líquidos.
 - 2.1.2. Acotaciones al estudio de los lubricantes líquidos.
- 2.2. Clasificación de los lubricantes líquidos atendiendo a su procedencia.
- 2.3. Generación de los aceites base de los lubricantes líquidos.
 - 2.3.1. Aceites base minerales. (Composición y fabricación).
 - 2.3.2. Aceites base sintéticos. (Composición y fabricación).
- 2.4. Propiedades genéricas de los aceites base de los lubricantes líquidos.
 - 2.4.1. Generalidades.
 - 2.4.2. Propiedades intrínsecas (viscosidad, densidad, calor específico, conductividad, estabilidad a la oxidación, acidez, alcalinidad, porcentaje de coquización, punto de inflamación, punto de combustión, punto de niebla, punto de congelación, punto de descongelación, poder anticorrosivo, poder detergente, poder demulsionante, poder antiespumante, poder de resistir fuertes presiones, carencia de volatilidad).
 - 2.4.3. Propiedades extrínsecas (untuosidad y poder lubricante).
- 2.5. Aditivos a los aceite base de los lubricantes líquidos.
 - 2.5.1. Generalidades.
 - 2.5.2. Tipos de aditivos (Modificadores: Del índice de viscosidad, del punto de congelación, de la untuosidad, del poder antioxidante, del poder detergente, del poder antiespumante, del poder antidesgaste, de la capacidad de resistir fuertes presiones, del poder anticorrosivo, del poder anticongelante, de la basicidad, o del poder dispersante).

2. ESTUDIO GENERAL DE LOS LUBRICANTES LÍQUIDOS

- 2.6. Conformación de los lubricantes líquidos.
- 2.7. Propiedades y aplicaciones de los diferentes tipos de lubricantes líquidos.
 - 2.7.1. Introducción.
 - 2.7.2. Propiedades de los aceites base minerales. (De base parafínica, de base nafténica, de base bencénica).
 - 2.7.3. Propiedades de los aceites base sintéticos. (polialfaoleinas, alquilbencenos, poliisobutilenos, diésteres, ésteres de poliol, ésteres de fosfatos, perfloruroalquileter, poliglicoles, siliconas, ésteres de silicatos, ésteres de polifenil).
- 2.8. Comparación entre los lubricantes minerales y sintéticos.
 - 2.8.1. Ventajas y desventajas de los lubricantes minerales.
 - 2.8.2. Ventajas y desventajas de los lubricantes sintéticos.
- 2.9. Envejecimiento de los lubricantes líquidos.
- 2.10. Lubricantes líquidos industriales
 - 2.10.1. Normativas (ISO, AENOR-UNE, ACEA, SAE, API, Diversos fabricantes).
 - 2.10.2. Tablas comparativas entre normativas.
 - 2.10.3. Lubricantes monogrado y multigrado.

3. ESTUDIO GENERAL DE LOS LUBRICANTES PASTOSOS O GRASAS

- 3.1. Definición de los lubricantes pastosos o grasas.
- 3.2. Clasificación de los lubricantes pastosos atendiendo a su procedencia.
- 3.3. Composición de los lubricantes pastosos.
- 3.4. Generación de grasas.
 - 3.4.1. Aceite base.
 - 3.4.2. Espesantes. (Con base jabonosa y con base no jabonosa).
 - 3.4.3. Fabricación de las grasas.
- 3.5. Propiedades genéricas de las grasas.
 - 3.5.1. Propiedades intrínsecas de las grasas (consistencia, viscosidad, punto de goteo, separación del aceite, estabilidad mecánica y estabilidad a la oxidación).
 - 3.5.2. Propiedades extrínsecas de las grasas (Bombeabilidad, untuosidad y lubricidad).

CONTENIDO DEL TEMA

3. ESTUDIO GENERAL DE LOS LUBRICANTES PASTOSOS O GRASAS

- 3.6. Aditivos de las grasas.
 - 3.6.1. Cuadro de aditivos.
 - 3.6.2. Relaciones con los espesantes. (Pasivadores y modificadores de adherencia).
- 3.7. Conformación, propiedades y aplicaciones de los diferentes tipos de grasas.
 - 3.7.1. Introducción.
 - 3.7.2. Grasas minerales. (Simples, complejas y semicomplejas).
 - 3.7.3. Grasas sintéticas.(Orgánicas e inorgánicas).
 - 3.7.4. Pastas lubricantes.
- 3.8. Incompatibilidad entre grasas.
- 3.9. Envejecimiento de las grasas.
- 3.10. Normalizaciones de las grasas

4. ESTUDIO GENERAL DE LOS LUBRICANTES SÓLIDOS

- 4.1. Definición de los lubricantes sólidos. (Laminares y no laminares).
- 4.2. Clasificación de los lubricantes sólidos atendiendo a su procedencia.
 - 4.2.1. Lubricantes sólidos inorgánicos. (Metálicos y no metálicos).
 - 4.2.2. Lubricantes sólidos orgánicos. (Plásticos).
- 4.3. Propiedades genéricas de los lubricantes sólidos.
- 4.4. Propiedades y aplicaciones de los lubricantes sólidos.
 - 4.4.1. Lubricantes sólidos inorgánicos.
 - 4.4.2. Lubricantes sólidos orgánicos.

5. SELECCIÓN ENTRE LOS DIFERENTES TIPOS DE LUBRICANTES

- 5.1. Introducción a la elección del tipo de lubricante.
- 5.2. Factores a considerar en el empleo de lubricantes líquidos.
- 5.3. Factores a considerar en el empleo de lubricantes pastosos.
- 5.4. Factores a considerar en el empleo de lubricantes sólidos.

CONTENIDO DEL TEMA

6. EJEMPLOS DE APLICACIÓN DE LOS LUBRICANTES INDUSTRIALES

- 6.1. Motores de gasolina.
- 6.2. Motores diésel.
- 6.3. Turbinas de gas.
- 6.4. Turbinas de vapor.
- 6.5. Compresores de aire.
- 6.6. Compresores frigoríficos.

2. ESTUDIO GENERAL DE LOS LUBRICANTES LÍQUIDOS

2.1. Introducción al estudio de los lubricantes líquidos

2.1.1. Definición de los lubricantes líquidos

Los lubricantes líquidos son los que se encuentran en este estado en condiciones normales de trabajo. Además de reducir la fricción (son los únicos que posibilitan la lubricación hidrodinámica, la elastohidrodinámica y la hidrostática), son los únicos capaces de extraer el calor producido en los rozamientos (por conducción, hasta un intercambiador donde es refrigerado), así como también transportar los restos de desgastes y otros contaminantes hacia filtros en que queden atrapados, de modo que no perjudiquen a la máquina y permitan un posterior análisis de las causas de los fallos en las mismas. Sus orígenes son muy diversos y sus propiedades pueden modificarse con la adición de “aditivos”, con lo que el rango de aplicación es amplísimo.

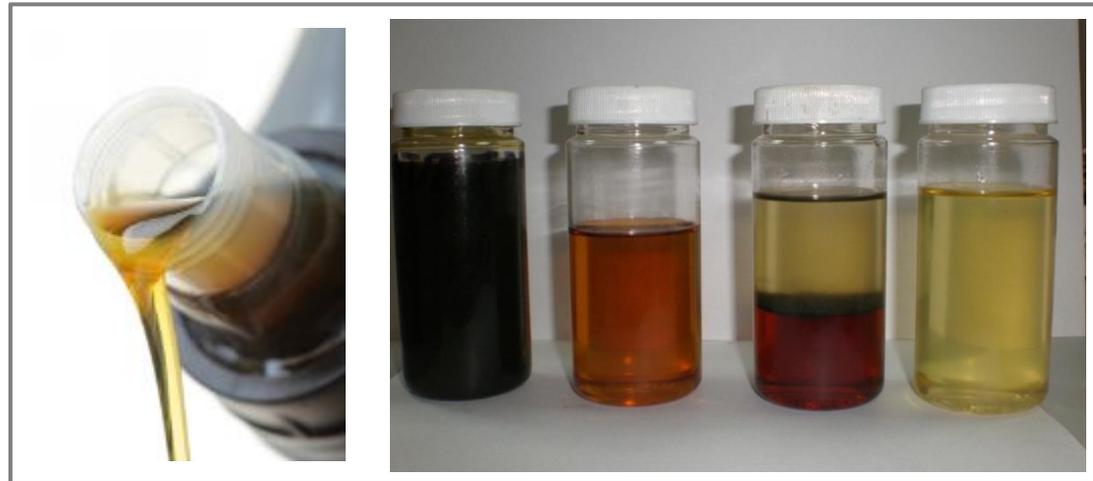


Fig. 75 Ejemplos de lubricantes líquidos

2. ESTUDIO GENERAL DE LOS LUBRICANTES LÍQUIDOS

2.1. Introducción al estudio de los lubricantes líquidos

2.1.2. Acotaciones al estudio de los lubricantes líquidos

De todos los tipos existentes solo tienen interés industrial los lubricantes derivados del petróleo y los lubricantes sintéticos y en ellos se centrará todo el estudio realizado a continuación.

En puridad la palabra lubricante líquido debería aplicarse al conjunto de la base (un aceite de petróleo o sintético) y los correspondientes aditivos que lleve incorporados.

Sin embargo esta distinción no se realiza vulgarmente, de forma que los lubricantes líquidos se suelen denominar aceites lubricantes, o simplemente aceites.

En este estudio la palabra lubricante se usará para el conjunto de aceite base mas los aditivos.

2. ESTUDIO GENERAL DE LOS LUBRICANTES LÍQUIDOS

2.3. Generación de los aceites base de los lubricantes líquidos

2.3.2. Aceites base sintéticos

Composición del aceite base

Los aceites sintéticos (no naturales, puesto que no existen como tales en la naturaleza) también provienen del petróleo pero su obtención se realiza tanto por medios químicos (reacciones en laboratorio) y no “físicos” (destilación), como los naturales.

Su estructura molecular es definida por el fabricante, combinando adecuadamente diferentes polímeros.

Con ellos se consiguen propiedades muy diversas y predecibles, de acuerdo a la aplicación posterior.

Todos se fabrican en laboratorios y plantas de procesado.

2. ESTUDIO GENERAL DE LOS LUBRICANTES LÍQUIDOS

2.3. Generación de los aceites base de los lubricantes líquidos

2.3.2. Aceites base sintéticos

Composición del aceite base

Los aceites base sintéticos son muy variados pero pueden dividirse en grandes grupos:

Hidrocarburos Sintetizados

Obtenidos como combinación de varios hidrocarburos de bajo peso molecular.

Polialfaoleinas (PAO)

Son el resultado de una reacción de polimerización entre el etileno y compuestos olefínicos. Son, por tanto, hidrocarburos, parecidos a los aceites parafínicos, pero libres de azufre, fósforo y ceras.

Alquilbencenos

Son el resultado de una reacción del benceno u otros compuestos aromáticos con una olefina.

Dependiendo de las cadenas alquílicas unidas al anillo bencénico pueden ser lineales o ramificados.

Poliisobutilenos

Son resultado de la polimerización de los butenos e isobutenos.

2. ESTUDIO GENERAL DE LOS LUBRICANTES LÍQUIDOS

2.3. Generación de los aceites base de los lubricantes líquidos

2.3.2. Aceites base sintéticos

Composición del aceite base

Ésteres

Obtenidos como reacción entre un ácido orgánico y un alcohol.

Diéster

Son el resultado de unir dos grupos carboxilos (característicos de los ácidos orgánicos diácidos) con alcohol (figura 1).

Esteres de poliol

Son el resultado de unir un grupo carboxilo (característicos de los ácidos orgánicos) con un alcohol que tiene mas de un grupo hidroxilo (grupo característico de los alcoholes).

Esteres de fosfatos

Se obtienen a partir de la síntesis entre el oxiclورو de fósforo y alcoholes o genoles (obtenidos estos últimos a partir de alquitrán de carbón o sintéticamente).

Perfluoro-alquileter (PFPE)

Todos los poliéteres perfluorados (PFPE) están compuestos de carbono, flúor y oxígeno, pero la estructura molecular de cada PFPE varía en función de los materiales base y los procesos de polimerización que utilicen los fabricantes.

2. ESTUDIO GENERAL DE LOS LUBRICANTES LÍQUIDOS

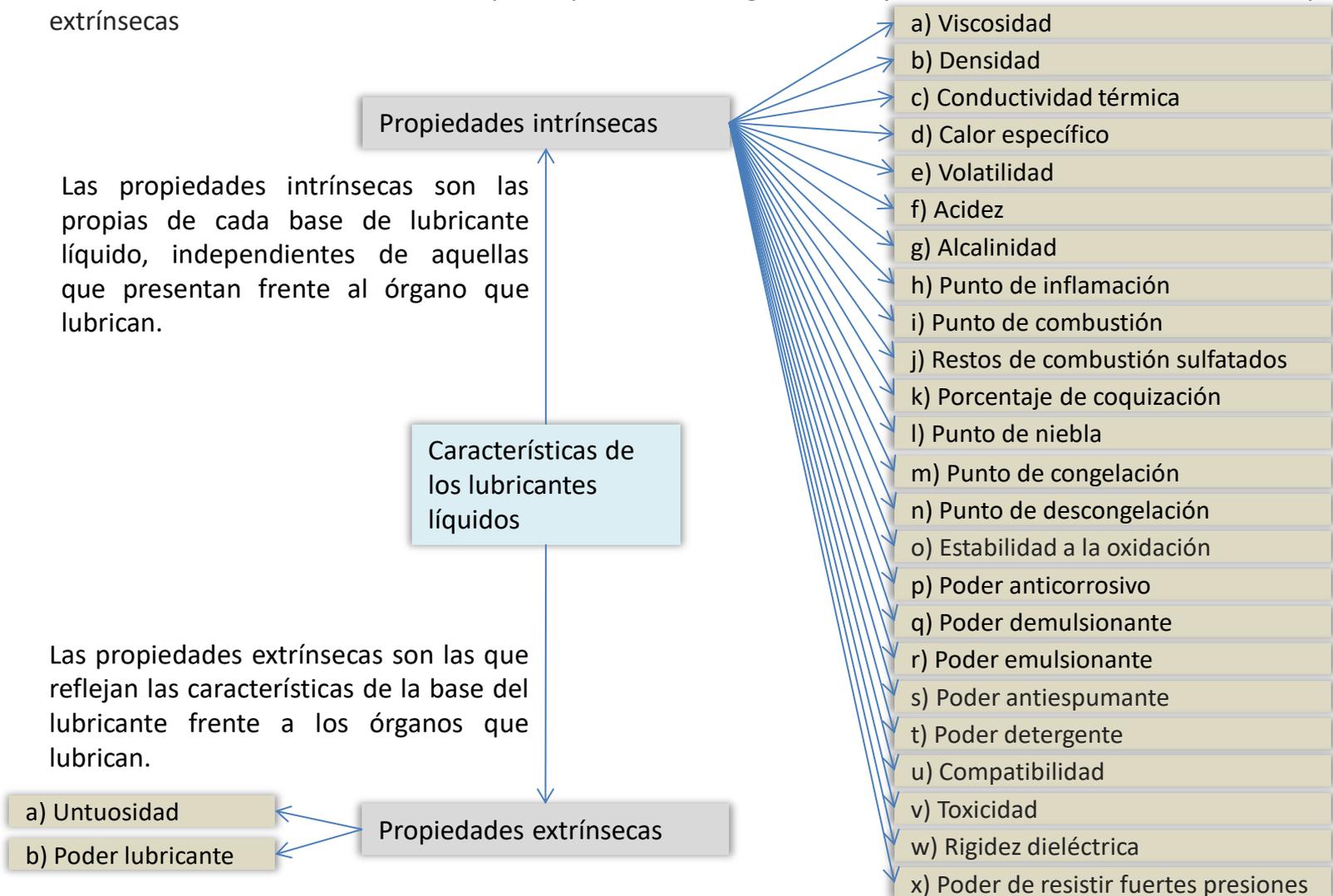
2.4. Propiedades genéricas de los aceites base de los lubricantes líquidos

2.4.1. Generalidades

Los aceites base de los lubricantes líquidos presentan el siguiente conjunto de características intrínsecas y extrínsecas

Las propiedades intrínsecas son las propias de cada base de lubricante líquido, independientes de aquellas que presentan frente al órgano que lubrican.

Las propiedades extrínsecas son las que reflejan las características de la base del lubricante frente a los órganos que lubrican.



- a) Untuosidad
- b) Poder lubricante

- a) Viscosidad
- b) Densidad
- c) Conductividad térmica
- d) Calor específico
- e) Volatilidad
- f) Acidez
- g) Alcalinidad
- h) Punto de inflamación
- i) Punto de combustión
- j) Restos de combustión sulfatados
- k) Porcentaje de coquización
- l) Punto de niebla
- m) Punto de congelación
- n) Punto de descongelación
- o) Estabilidad a la oxidación
- p) Poder anticorrosivo
- q) Poder demulsionante
- r) Poder emulsionante
- s) Poder antiespumante
- t) Poder detergente
- u) Compatibilidad
- v) Toxicidad
- w) Rigidez dieléctrica
- x) Poder de resistir fuertes presiones

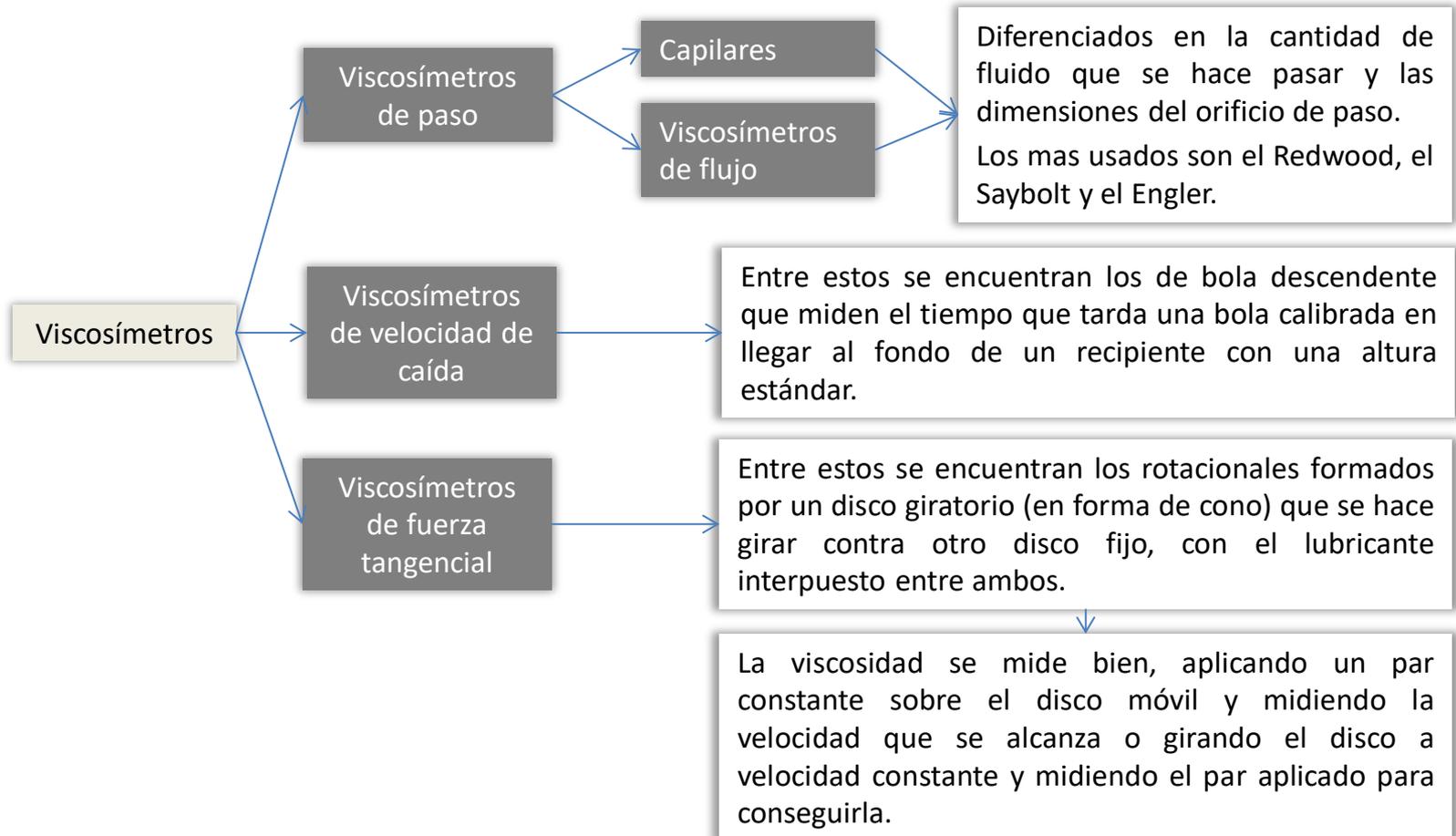
2. ESTUDIO GENERAL DE LOS LUBRICANTES LÍQUIDOS

2.4. Propiedades genéricas de los aceites base de los lubricantes líquidos

2.4.2. Propiedades intrínsecas

a) Viscosidad

Tipos de viscosímetros



2. ESTUDIO GENERAL DE LOS LUBRICANTES LÍQUIDOS

2.4. Propiedades genéricas de los aceites base de los lubricantes líquidos

2.4.2. Propiedades intrínsecas

a) Viscosidad

Tipos de viscosímetros



Viscosímetro de paso. VISCOSÍMETRO CAPILAR

Se emplea para medir la viscosidad cinemática. Se compone de un tubo de vidrio en forma de U como se ve en la figura 86.

Para la determinación de la viscosidad se introduce el viscosímetro en un baño de agua a una temperatura determinada (a la que se desea referir la viscosidad). Luego se va succionando el aceite contenido en el depósito 1 hasta que se llene el depósito 3. Tapando el tubo de succión se impide que el aceite retorne.

Luego se va dejando salir lentamente al aceite a través del tubo capilar calibrado hasta que alcance la línea de “marca de arranque”. En ese momento se comienza a medir el tiempo hasta que alcanza la “marca de paro”.

La viscosidad es el tiempo que transcurre entre las dos marcas, multiplicado por la constante del aparato (obtenida por calibraciones previas). Existen diversos modelos de laboratorio y no pueden emplearse en aceites usados.

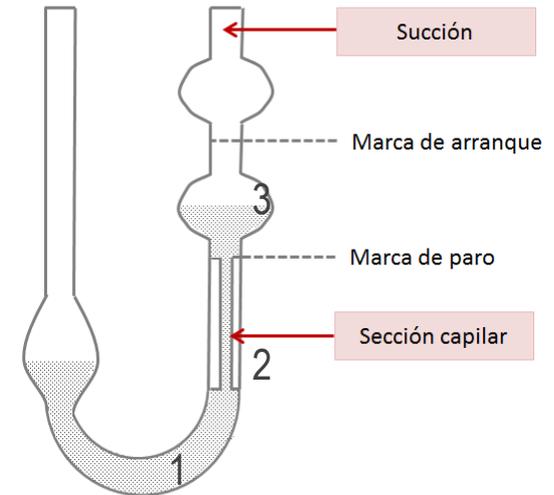


Fig.86 Viscosímetro capilar

2. ESTUDIO GENERAL DE LOS LUBRICANTES LÍQUIDOS

2.5. Aditivos a los aceites base de los lubricantes líquidos

2.5.1. Generalidades

Los lubricantes líquidos se tratan con aditivos para corregir sus características originales y dotarles de características especiales.

Los aditivos mas usuales se emplean para modificar

- a) El índice de viscosidad
- b) El punto de congelación
- c) La untuosidad
- d) El poder antioxidante
- e) El poder detergente
- f) El poder antiespumante
- g) La capacidad de resistir fuertes presiones

Existen otros aditivos

- h) Anti-desgaste
- i) Anticorrosivos
- j) Anticongelantes
- k) De basicidad
- l) Dispersantes

2. ESTUDIO GENERAL DE LOS LUBRICANTES LÍQUIDOS

2.5. Aditivos a los aceites base de los lubricantes líquidos

2.5.2. Tipos de aditivos

a) Aditivos que modifican el índice de viscosidad

Aditivos que modifican el índice de viscosidad	FUNCIÓN	Estos aditivos permiten que el lubricante se mantenga lo suficientemente fluido en frío (facilitando el arranque de la máquina a baja temperatura) o lo suficientemente viscoso en caliente para evitar el contacto entre las piezas en movimiento.
	MODO DE ACCIÓN	La disminución de la viscosidad con la temperatura se mejora con la adición de polímeros orgánicos, que a baja temperatura quedan en suspensión en el lubricante en forma de pequeñas bolitas de gran movilidad; cuando la temperatura se eleva, se agrupan estas bolitas aumentando con ello la viscosidad del lubricante.
	COMPOSICIÓN	Los polímeros mas utilizados que permiten mantener la viscosidad en caliente, provienen de las siguientes familias químicas: <ul style="list-style-type: none"> • Polimetacrilato (PMA) • Copolímeros de hidrocarburos etilénicos (OCP) • Copolímeros mixtos PMA- OCB • Derivados de isopreno, de isopreno - estireno hidrogenado • Derivados de estireno- butadieno hidrogenado

2. ESTUDIO GENERAL DE LOS LUBRICANTES LÍQUIDOS

2.5. Aditivos a los aceites base de los lubricantes líquidos

2.5.2. Tipos de aditivos

b) + c) Aditivos que modifican el punto de congelación o la untuosidad

Aditivos que modifican el punto de congelación	
COMPOSICIÓN	El punto de congelación puede bajarse con los mismos polímeros que mejoran el índice de viscosidad.
MODO DE ACCIÓN	Los polímeros introducidos son absorbidos por los cristales de parafina al iniciarse su formación dificultando su crecimiento y por tanto la congelación del lubricante.
FUNCIÓN	Se emplean con el fin de poder utilizar los lubricantes a temperaturas mucho mas bajas que si estuviese utilizándose el lubricante solo.

Aditivos que modifican la untuosidad	
COMPOSICIÓN	Se utilizan compuestos que contengan productos oxigenados y halógenos de gran afinidad con los metales, o ácidos grasos de origen vegetal (Acido esteárico, por ejemplo).
MODO DE ACCIÓN	Consiste en formar moléculas polares en el lubricante, lo que se traduce en un aumento de la adherencia al órgano lubricado.
FUNCIÓN	Estos aditivos tienen por misión mejorar la adhesión del lubricante al órgano que lubrica, es decir, su untuosidad.

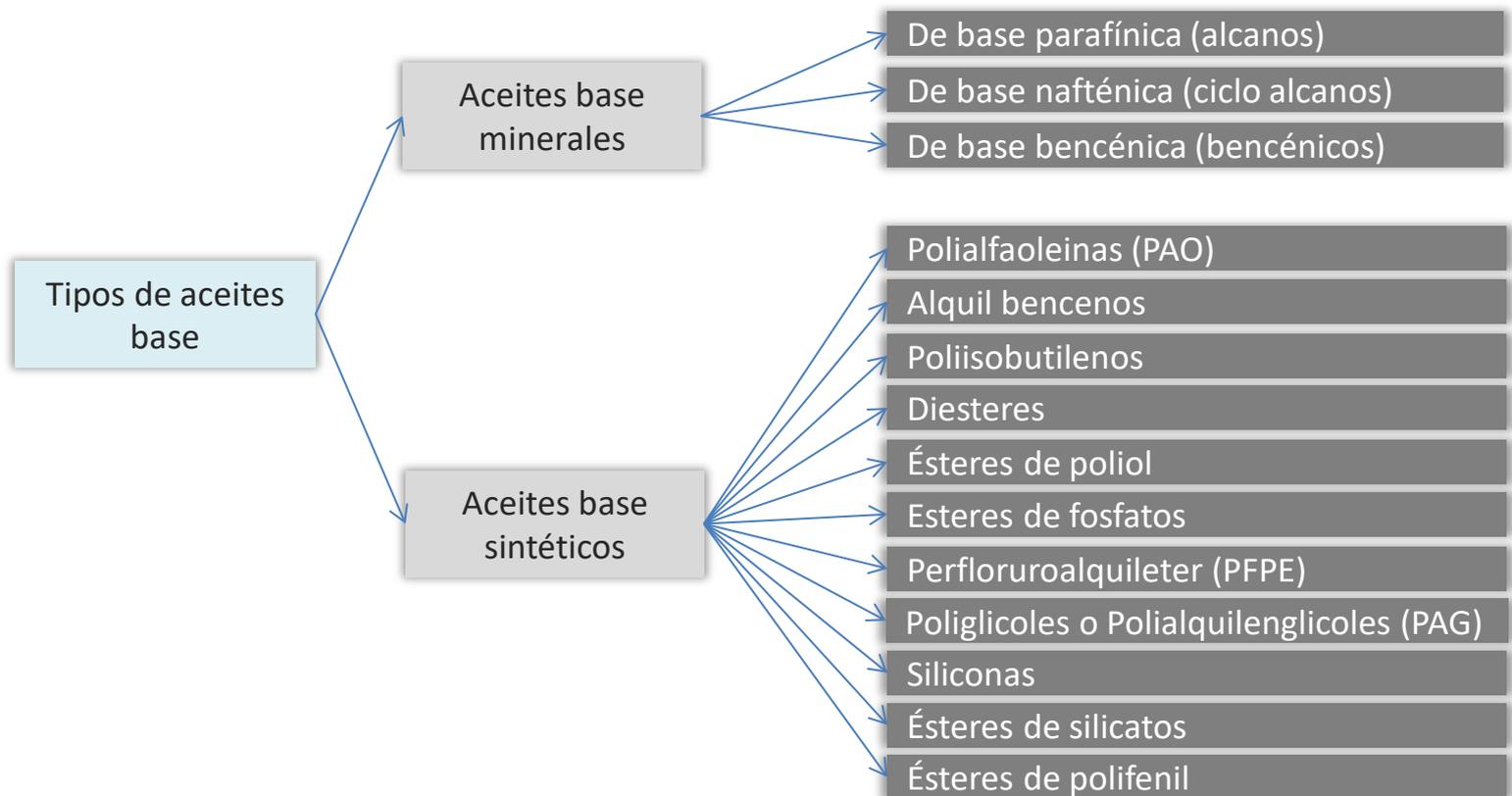
2. ESTUDIO GENERAL DE LOS LUBRICANTES LÍQUIDOS

2.7. Propiedades y aplicaciones de los diferentes tipos de lubricantes líquidos

2.7.1. Introducción

Los diferentes tipos de aceites base, tanto naturales como sintéticos, presentan las propiedades descritas anteriormente de manera diferenciada.

El conocimiento de las propiedades particulares de cada uno es importante de cara a definir sus aplicaciones directas, así como a su posterior preparación como lubricantes, incluyendo las necesidades de aditivos.



2. ESTUDIO GENERAL DE LOS LUBRICANTES LÍQUIDOS

2.7. Propiedades y aplicaciones de los diferentes tipos de lubricantes líquidos

2.7.2. Propiedades de los aceites de base minerales

De base parafínica (alcanos)

PROPIEDADES

- (-) Gran contenido de parafinas.
- (+) Baja densidad.
- (+) Alto índice de viscosidad (viscosidad muy estables ante los cambios de temperatura).
- (+) Baja viscosidad a bajas temperaturas.
- (+) Buena estabilidad química.
- (+) Resistentes a la oxidación.
- (+) Alto punto de inflamación.
- (+) Baja volatilidad.
- (-) Residuos carbonosos muy duros.

APLICACIONES

- Lubricación de sistemas a pérdida y por circulación, sistemas hidráulicos, turbinas de vapor, gas e hidráulicas, bombas de pozos, compresores rotativos, etc. (en muchos casos requieren aditivos de extrema presión y un alto nivel de refinado).
- Transformadores de bajo voltaje (tratado con arcilla activada).
- Fabricación de caucho con baja polaridad (EPDM).

2. ESTUDIO GENERAL DE LOS LUBRICANTES LÍQUIDOS

2.7. Propiedades y aplicaciones de los diferentes tipos de lubricantes líquidos

2.7.3. Propiedades de los aceites de base sintéticos

PROPIEDADES

- (+) Poseen una buena estabilidad térmica que les permite soportar temperaturas hasta los 180°C, lo que supone un alto punto de inflamación.
- (+) Al carecer de ceras pueden trabajar a temperaturas hasta 62°C bajo cero.
- (+) Su índice de viscosidad es superior a 135.
- (+) Tienen muy baja volatilidad.
- (+) Debido a la ausencia de azufre poseen una buena resistencia a la oxidación (inferior a la de los aceites minerales), pero puede mejorarse con los correspondientes aditivos.
- (-) Tienen una capacidad limitada para absorber ciertos aditivos por lo que se les agrega una cierta cantidad de diéster o poliéster.
- (+) No emulsionan en el agua ni en el aire.
- (+) Son multigrado según la clasificación SAE para motor y cajas de cambio.
- (+) Son compatibles con los aceites minerales.
- (+) Son biodegradables (absorbibles por bacterias).
- (+) Baja toxicidad.

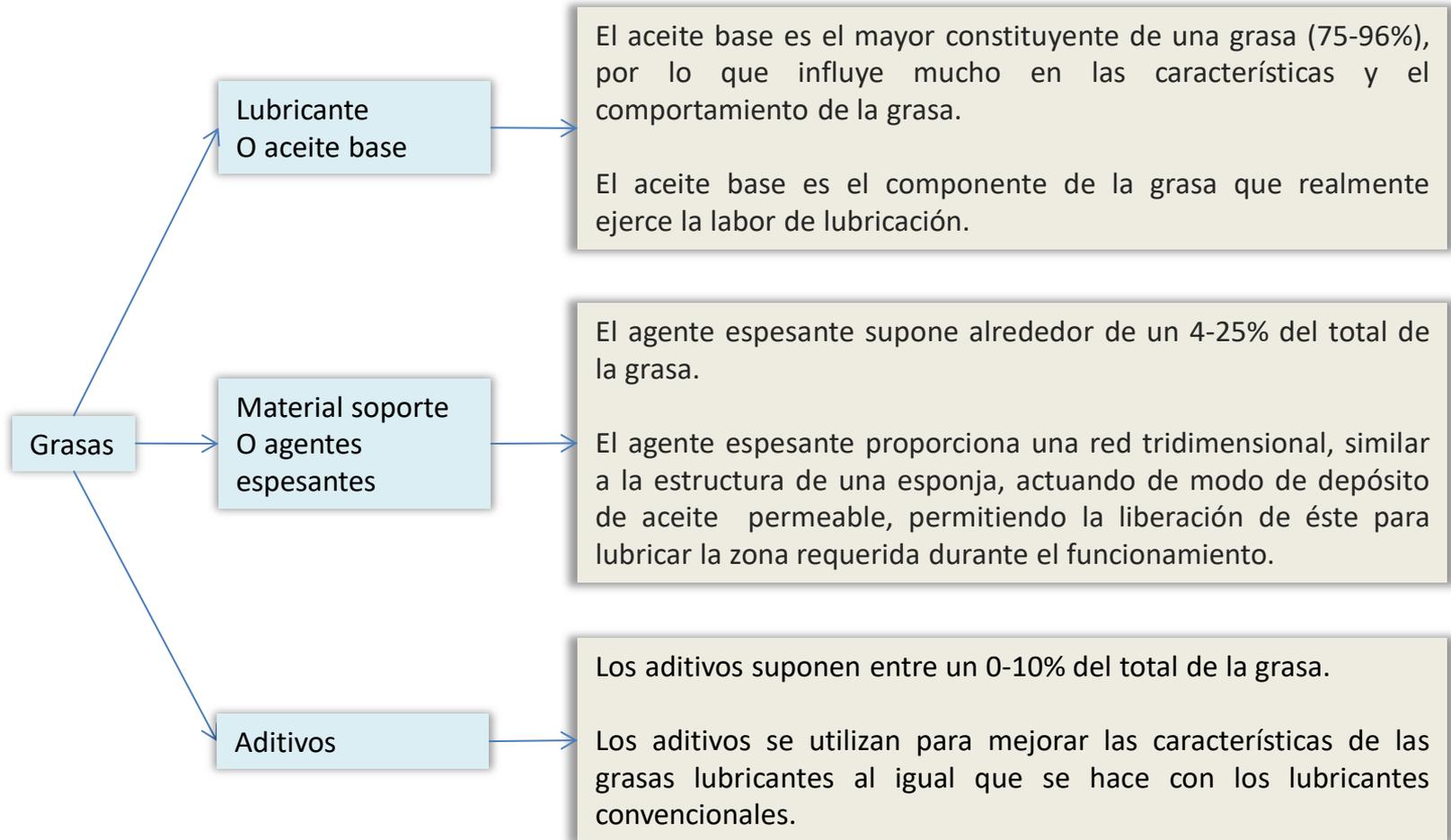
APLICACIONES

- Se emplean como fluidos base en lubricantes para motores, engranjes industriales y automotrices, transmisiones automáticas, compresores rotativos, turbinas, cojinetes que trabajan a altas temperaturas y como fluidos hidráulicos.

3. ESTUDIO GENERAL DE LOS LUBRICANTES PASTOSOS O GRASAS

3.3. Composición de los lubricantes pastosos

Las grasas no naturales (industriales) se constituyen con tres componentes: el lubricante (aceite base), el soporte del lubricante (espesante) y en su caso los aditivos.

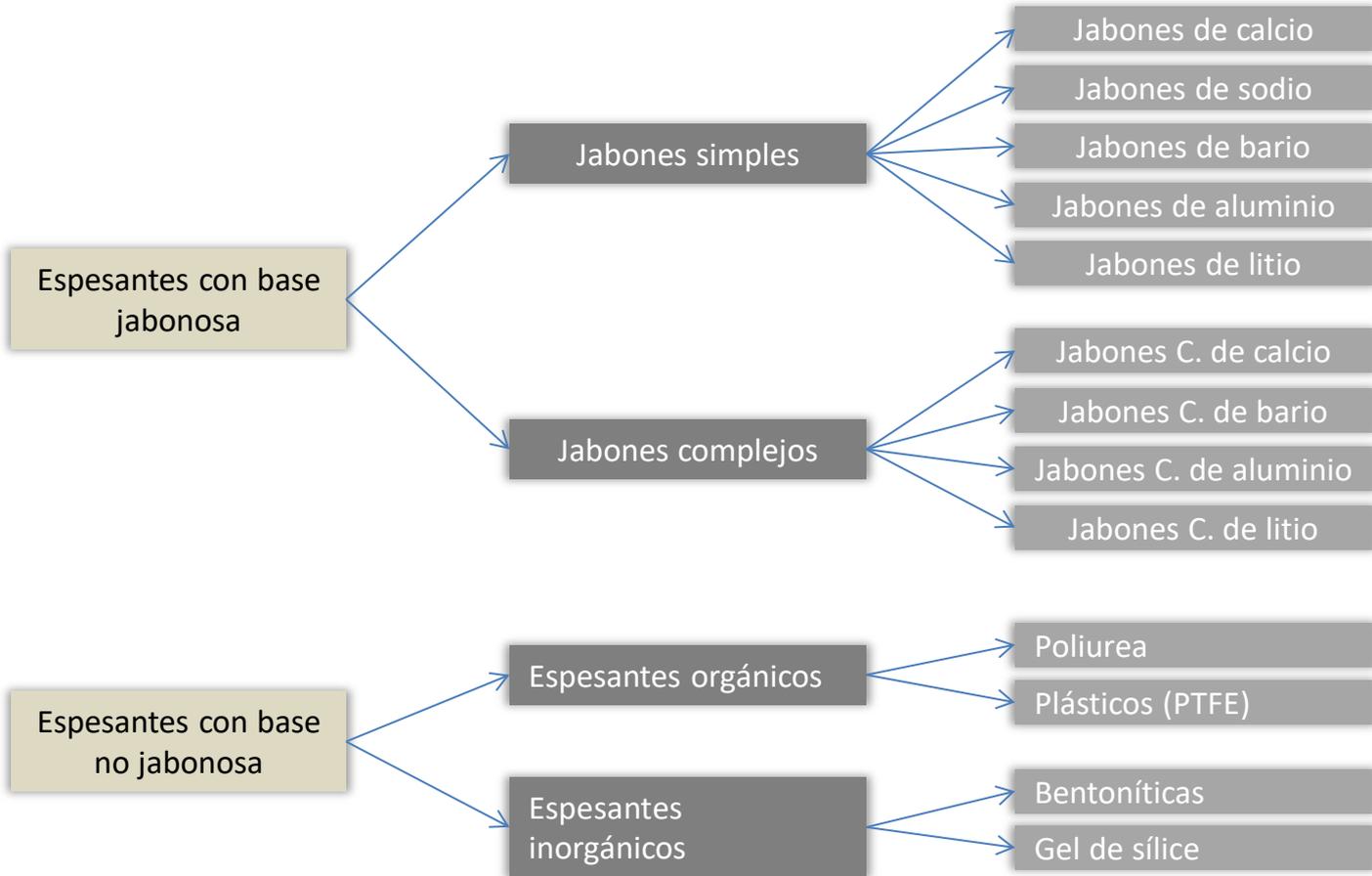


3. ESTUDIO GENERAL DE LOS LUBRICANTES PASTOSOS O GRASAS

3.4. Generación de grasas

3.4.2. Espesantes

Existen diferentes tipos de espesantes divididos en dos grandes grupos: de base jabonosa y de base no jabonosa. Los primeros pueden ser simples o complejos, mientras que los segundos pueden ser orgánicos o inorgánicos.



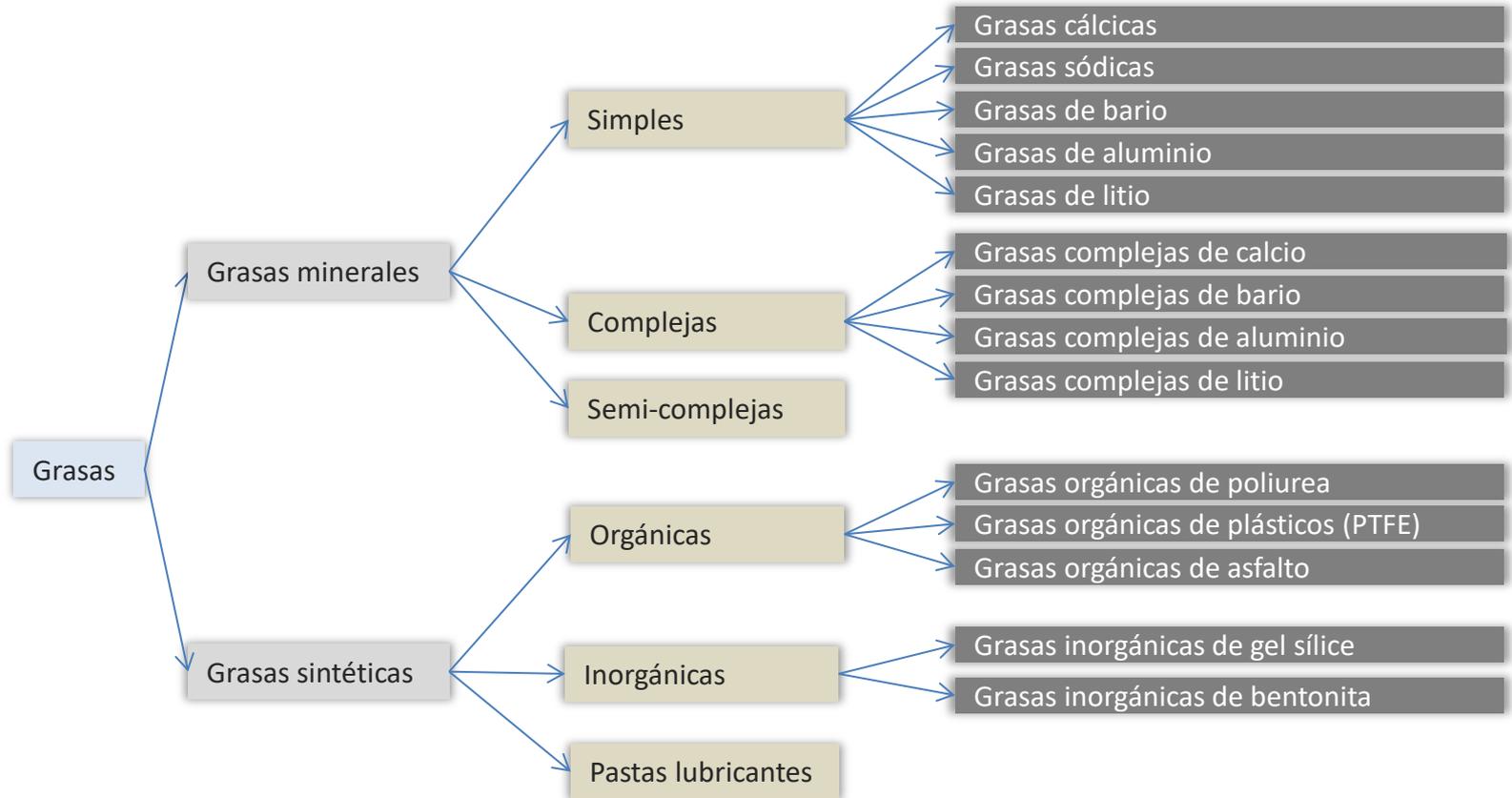
3. ESTUDIO GENERAL DE LOS LUBRICANTES PASTOSOS O GRASAS

3.7. Conformación, propiedades y aplicaciones de los diferentes tipos de lubricantes pastosos

3.7.1. Introducción

Las grasas, tanto naturales como sintéticas se conforman como se vio en el punto 3.4.3, uniendo el aceite base con el espesante y añadiéndole los aditivos.

Por tanto sus propiedades y aplicaciones dependen de estos tres componentes de las mismas.



3. ESTUDIO GENERAL DE LOS LUBRICANTES PASTOSOS O GRASAS

3.7. Conformación, propiedades y aplicaciones de los diferentes tipos de lubricantes pastosos

3.7.2. Grasas minerales

Simples

CONFORMACIÓN

Se conforman mezclando un aceite base mineral con un jabón de calcio y aditivos

PROPIEDADES

Estructura suave, mantecosa

(+) Buen comportamiento a bajas temperaturas (blanda)

(±) Regular estabilidad mecánica

(+) Buena resistencia al agua (no se disuelven en agua)

(-) Bajo punto de goteo (no soportan temperaturas superiores a los 60°C) (en grasas cálcicas compuestas puede llegarse a los 80°C)

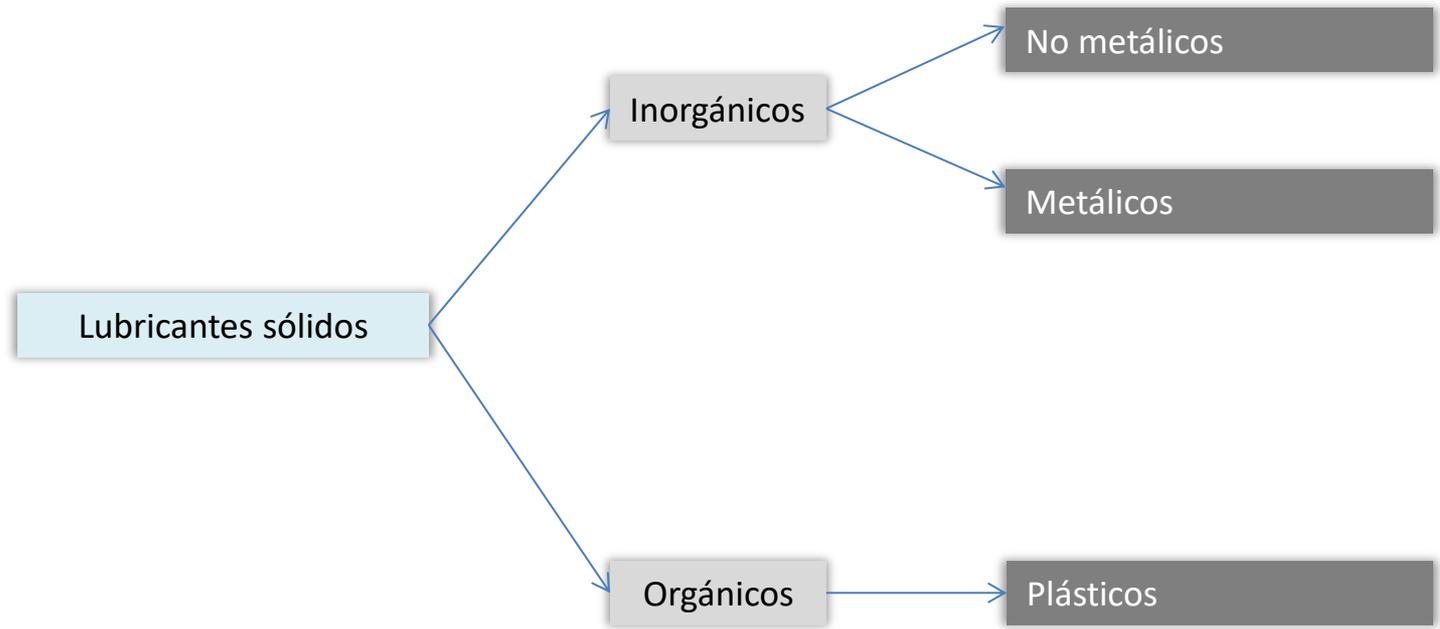
(-) Baja protección anticorrosiva

APLICACIONES

- Maquinaria de baja precisión, cuando se requieran frecuentes engrases por polvo o suciedad.
- Cojinetes de bajas velocidades.
- Sellos laberínticos en contacto con agua.
- Con aditivos de plomo son resistentes al agua salada por lo que se utilizan en ambientes marinos.

4. ESTUDIO GENERAL DE LOS LUBRICANTES SÓLIDOS

4.2. Clasificación de los lubricantes sólidos atendiendo a su procedencia



4. ESTUDIO GENERAL DE LOS LUBRICANTES SÓLIDOS

4.2. Clasificación de los lubricantes sólidos atendiendo a su procedencia

4.2.1. Lubricantes sólido inorgánicos

No metálicos

- Talco y mica (empleados como aditivos de los aceites y para lubricar la madera)
- Grafito coloidal (empleado como lubricante seco o mezclado con aceites y grasas grafitadas)
- Azufre pulverizado o coloidal (empleado para evitar el gripaje de los motores)
- Azufre combinado (empleado para el trabajo de los metales)
- Bisulfuro de molibdeno (empleado como lubricante seco, mezclado en grasas o en suspensión en aceites)
- Bisulfuro de tungsteno y de tántalo
- Nitruro de boro exagonal (grafito blanco)
- Fluoruro cálcico
- Parafinas y ceras minerales (empleados como antioxidantes)

Metálicos

Metales y aleaciones de bajo punto de fusión que al elevarse la temperatura (mas allá de la normal) se funden parcialmente creando una película de lubricante durante un cierto tiempo (que permite, por ejemplo, una parada segura de la máquina)

Entre estos se encuentran el plomo, estaño y zinc como materiales blandos sobre acero y otros metales duros como plata, oro e indio.

Con los blandos se constituyen las aleaciones antifricción como el Babbit (92% Sn, 8% Pb), Delta (60% Sn, 385 Zn, 2Fe), Magnolia (21% Sn, 78% Pb, 1% Cu)

4. ESTUDIO GENERAL DE LOS LUBRICANTES SÓLIDOS

4.2. Clasificación de los lubricantes sólidos atendiendo a su procedencia

4.2.2. Lubricantes sólido orgánicos

Plásticos

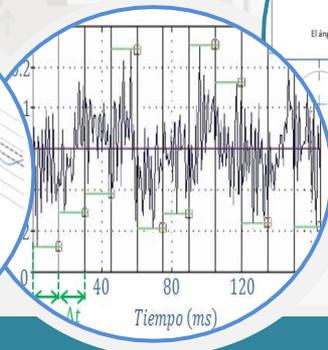
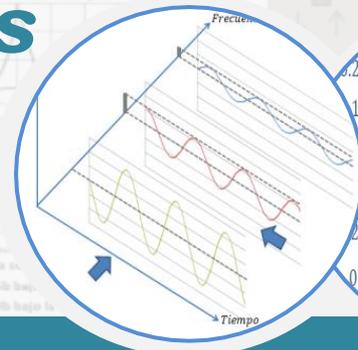
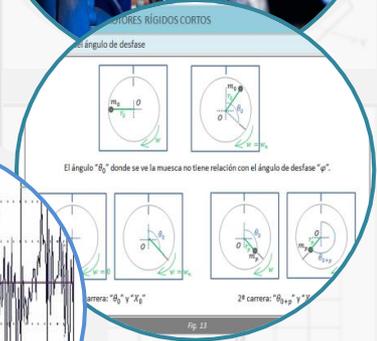
- Politetrafloruro de etileno (PTFE) (Teflón)
- Nylon
- Polieter eter ketone (cetona) (PEEK)
- Sulfuro de polifenilo (Láminas fenólicas) (PPS)
- Poliimida (PI)

ICl

MÁSTER DE MANTENIMIENTO DE MÁQUINAS

MÓDULO 2

Teoría de vibraciones aplicada al mantenimiento de máquinas



TEMA 5

ANÁLISIS DE VIBRACIONES DE SISTEMAS

VIBRANTES EN DIFERENTES DOMINIOS

PREÁMBULO

Este tema denominado ANÁLISIS DE VIBRACIONES DE SISTEMAS VIBRANTES EN DIFERENTES DOMINIOS es el quinto de los cinco temas de los que consta el Módulo 2 TEORÍA DE VIBRACIONES APLICADA AL MANTENIMIENTO DE MÁQUINAS del Master de MANTENIMIENTO DE MÁQUINAS y se enmarca dentro de su primer bloque CONCEPTOS PREVIOS en el contexto de lograr una progresividad en el aprendizaje .

En este Tema se realiza el análisis de los sistemas vibrantes (la relación que guarda la excitación con la vibración del mismo) desde diferentes “enfoques” o “dominios” (dominio del tiempo, de la frecuencia y modal).

El tema consta de cuatro partes:

- En la primera se realiza una primera aproximación a los diferentes dominios desde donde puede abordarse el análisis de las vibraciones mecánicas
- En la segunda parte se exponen los aspectos fundamentales del análisis de las vibraciones en el dominio del tiempo y sus aplicaciones mas importantes al mantenimiento de máquinas.
- En la tercera parte se exponen los aspectos fundamentales de análisis del análisis de las vibraciones en el dominio de la frecuencia y sus aplicaciones mas importantes de cara al mantenimiento de las máquinas
- En la cuarta parte se realiza un recordatorio de la escala logarítmica y su uso en el análisis de las vibraciones en máquinas

CONTENIDO DEL TEMA

1. INTRODUCCIÓN AL ANÁLISIS DE VIBRACIONES EN SISTEMAS VIBRANTES EN DIFERENTES DOMINIOS

- 1.1. Introducción general
- 1.2. Introducción al análisis en el dominio del tiempo
- 1.3. Introducción al análisis en el dominio de la frecuencia
- 1.4. Comparación entre el análisis en el dominio del tiempo y de la frecuencia
- 1.5. Introducción al análisis en el dominio modal
- 1.6. Comparación entre el análisis en el dominio modal, de la frecuencia y del tiempo
- 1.7. Preferencias para seleccionar el dominio de análisis

2. ANÁLISIS DE SISTEMAS VIBRANTES EN EL DOMINIO DEL TIEMPO

- 2.1. Generalidades
- 2.2. Correlación cruzada
- 2.3. Análisis orbital
- 2.4. Diagrama de Bode
- 2.5. Diagrama de Nyquist
- 2.6. Análisis por envolvente
- 2.7. Análisis por valores pico (PeakVue)

3. ANÁLISIS DE SISTEMAS VIBRANTES EN EL DOMINIO DE LA FRECUENCIA

- 3.1. Generalidades
- 3.2. Análisis en frecuencia de un sistema de 1 GDL en respuesta a una excitación periódica
- 3.3. Espectro cruzado
- 3.4. Función de coherencia
- 3.5. Gráfico cascada temporal
- 3.6. Gráfico cascada en velocidad
- 3.7. Análisis cepstrum
 - 3.7.1. Recordatorio sobre las escalas logarítmicas
 - 3.7.2. Análisis cepstrum

2. ANÁLISIS DE VIBRACIONES EN SISTEMAS VIBRANTES EN EL DOMINIO DEL TIEMPO

2.6. Análisis por envolvente

Este método permite analizar en el dominio del tiempo una vibración compleja, con armónicos de pequeña amplitud, como los originados por fallos en rodamientos y engranajes, y que pueden quedar enmascarados por armónicos de mayor amplitud con otras procedencias.

En la figura 225 se representa un rodamiento con una partícula metálica (una escama procedente de un desgaste, por ejemplo) pegada a la pista de rodadura exterior. Cada vez que una bola pasa sobre esta partícula se produce un ligero impacto que se traduce en una excitación transitoria que da lugar a la vibración de todo el rodamiento; como tal impacto esta excitación esta se compuesta por infinitos armónicos, de amplitudes progresivamente decrecientes.

En la figura se muestra una sucesión de ondas de excitación producida por los impactos de las sucesivas bolas que van pasando sobre la escama y se observa también como cada excitación se extingue antes de que la siguiente bola pase por la escama (lo cual depende de la distancia entre las bolas, de la velocidad de estas y del amortiguamiento del cojinete en su conjunto como sistema vibrante) (de la frecuencia de paso).

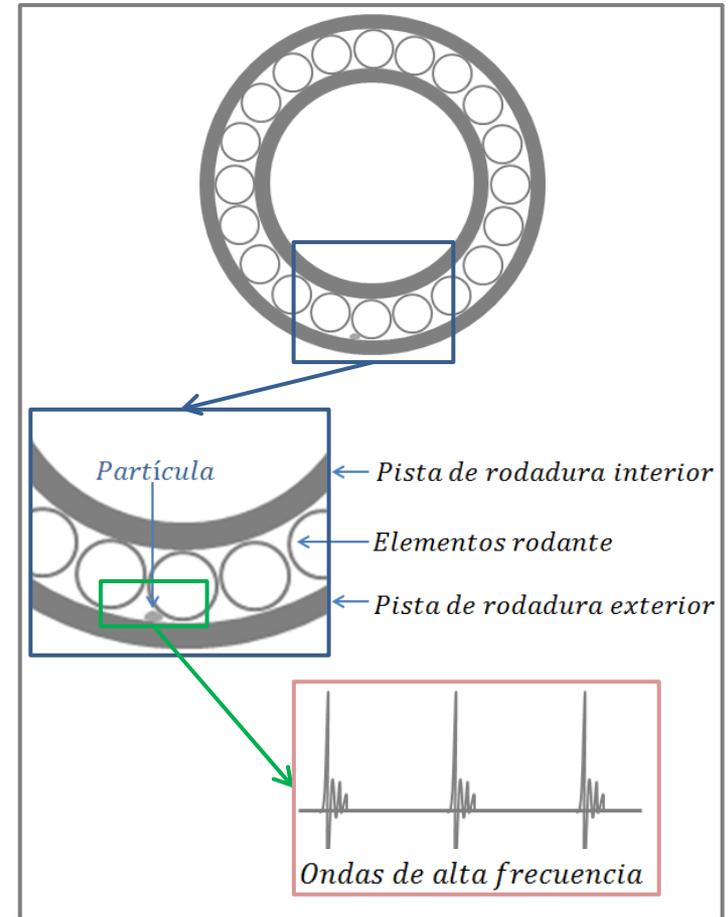


Fig. 225 Análisis por envolvente

En el Punto 1.3 del Tema 3 del Módulo 6 y en el punto 4.1. del tema 2 del Módulo 9 se presentan los valores de las frecuencias de paso

2. ANÁLISIS DE VIBRACIONES EN SISTEMAS VIBRANTES EN EL DOMINIO DEL TIEMPO

2.6. Análisis por envolvente

Las excitaciones vistas anteriormente ponen a vibrar al conjunto del cojinete y un sensor de vibración (un acelerómetro, por ejemplo) colocado en su soporte capta la vibración de este (que dependerá de la masa, rigideces y amortiguamientos de cada una de sus partes, además de las propias frecuencias).

Por otro lado cuando una bola produce el primer impulso y el cojinete se pone a vibrar la segunda bola que genera el nuevo impulso se encuentra el cojinete aún vibrando, y así sucesivamente. El resultado es que la vibración del conjunto del cojinete queda modulada por los impactos (en el argot técnico el impacto modula a la portadora, que es la vibración natural del cojinete).

En el Punto 5 del Tema 1 de este Módulo 2 se explica el concepto de modulación

Como cada armónico de la onda de excitación modula a todos los armónicos de la vibración del cojinete, el resultado observado en el sensor de la vibración es una onda modulada muy compleja. En la figura 227 se representa la forma de onda modulada por el primer armónico del impacto de la bola correspondiente al primer armónico de la vibración del cojinete.

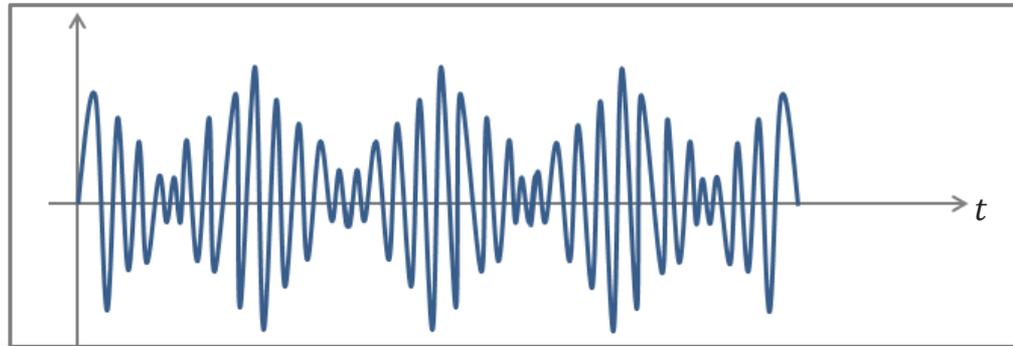


Fig. 227 Forma de onda modulada por el primer armónico del impacto de la bola correspondiente al primer armónico de la vibración del cojinete

2. ANÁLISIS DE VIBRACIONES EN SISTEMAS VIBRANTES EN EL DOMINIO DEL TIEMPO

2.6. Análisis por envolvente

En la práctica y con el objetivo de simplificar esta complejidad se coloca un filtro paso bajo (no deja pasar los armónicos de alta frecuencia) antes de proceder a la operación de calcular la envolvente.

La envolvente de esta onda compleja y filtrada es la mostrada en la figura 228. Al igual que en el caso anterior la frecuencia (o el periodo) de esta envolvente es la misma que la de los impactos.

Además, y dado que esta señal temporal puede ser fácilmente amplificada, su amplitud es mucho mas alta que la que se detectaría en el espectro normal con lo cual el defecto no pasaría desapercibido.

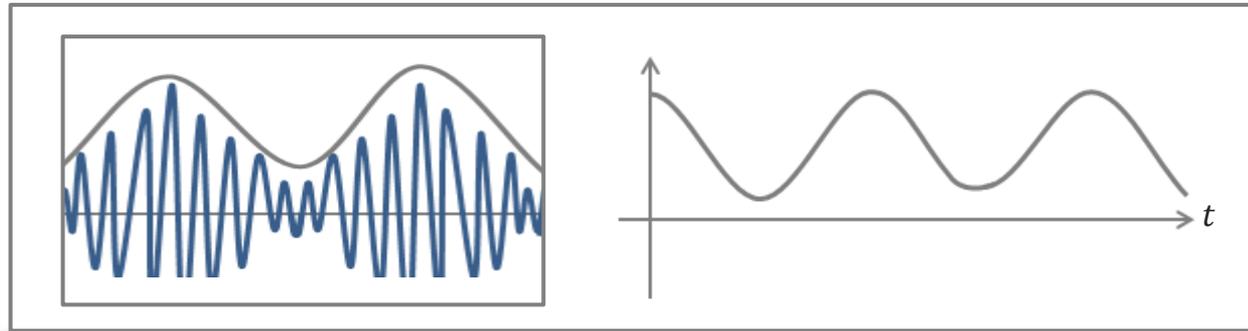


Fig. 228 Envolvente de la onda y onda filtrada

Como las frecuencias de paso de cada tipo de fallo en un rodamiento son conocidas, la frecuencia de la envolvente determina la existencia de un fallo y el tipo del mismo.

(En el caso del ejemplo que se viene exponiendo la frecuencia de la modulación indica un fallo en el camino de rodadura externo del rodamiento).

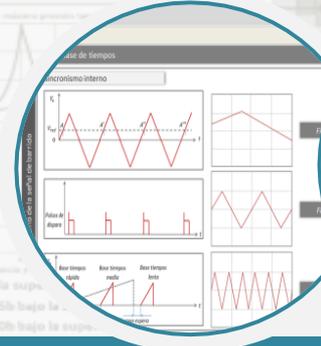
En el Punto 4.3 del Tema 2 del Módulo 9 se aplican estos conceptos al análisis de fallos en rodamientos

ICL

MÁSTER DE MANTENIMIENTO DE MÁQUINAS

MÓDULO 3

Instrumentación aplicada al mantenimiento de máquinas



TEMA 3

ELEMENTOS DEL SUBSISTEMA DE CAPTACIÓN Y ACONDICIONAMIENTO

PREÁMBULO

Este tema denominado ELEMENTOS DEL SUBSISTEMA DE CAPTACIÓN Y ACONDICIONAMIENTO es el tercero de los quince temas de los que consta el Módulo 3 INSTRUMENTACIÓN APLICADA AL MANTENIMIENTO DE MÁQUINAS del Master de MANTENIMIENTO DE MÁQUINAS y se enmarca dentro de su primer bloque CONCEPTOS PREVIOS en el contexto de lograr una progresividad en el aprendizaje.

Este tema se compone de seis partes:

- En la primera y segunda se presentan unos conceptos previos útiles para el estudio de las siguientes partes.
- En la tercera parte se realiza una amplia exposición de los sensores o transductores primarios, pero solo a nivel de concepto y no de sus aplicaciones a la medida de diferentes parámetros físicos (aceleraciones, fuerzas, etc.), lo que será abordado en los siguientes temas de este módulo.
- En la cuarta parte se exponen los elementos de acondicionamiento de la señal
- En la quinta parte se presentan los elementos de transmisión de la señal hacia el siguiente subsistema de la cadena de medida.

CONTENIDO DEL TEMA

1. CONCEPTOS PREVIOS

1.1. Recordatorio del Puento de Wheastone

2. COMPONENTES DEL SUBSISTEMA

2.1. Generalidades

3. ELEMENTOS DE CAPTACIÓN

3.1. Tipos de sensores

3.2. Sensores resistivos

3.2.1. Potenciómetros

3.2.2. Galgas extensiométricas

3.3. Sensores capacitivos

3.4. Sensores inductivos

3.5. Sensores inductivos diferenciales (L.V.D.T.)

3.6. Sensores de corrientes parásitas

3.7. Sensores piezoeléctricos

3.8. Sensores magnetostrictivos

3.9. Sensores electromagnéticos

3.10. Sensores magnetoestáticos (efecto Hall)

3.11. Sensores termoresistivos

3.12. Sensores termoeléctricos

3.13. Sensores fotoconductivos

3.14. Sensores fotoemisivos

3.15. Sensores fotoeléctricos

3.16. Sensores electro ópticos

3.17. Sensores ópticos (interferómetros)

3.18. Sensores fuerza-desplazamiento

3.19. Sensores presión-desplazamiento

3.20. Sensores temperatura-desplazamiento

CONTENIDO DEL TEMA

4. ELEMENTOS DE ACONDICIONAMIENTO DE LA SEÑAL

- 4.1. Tipos de elementos de acondicionamiento de la señal
- 4.2. Fuentes de alimentación
- 4.3. Amplificadores de la señal
 - 4.3.1. Definición
 - 4.3.2. Tipos de amplificadores
 - 4.3.3. Amplificadores electrónicos: AC, DC, operacionales, diferenciales
 - 4.3.4. Amplificadores mecánicos
 - 4.3.5. Amplificadores ópticos
- 4.4. Adaptadores de impedancias
- 4.5. Moduladores de la señal
 - 4.5.1. Introducción
 - 4.5.2. Moduladores de amplitud
 - 4.5.3. Moduladores de frecuencia

5. ELEMENTOS DE TRANSMISIÓN DE LA SEÑAL

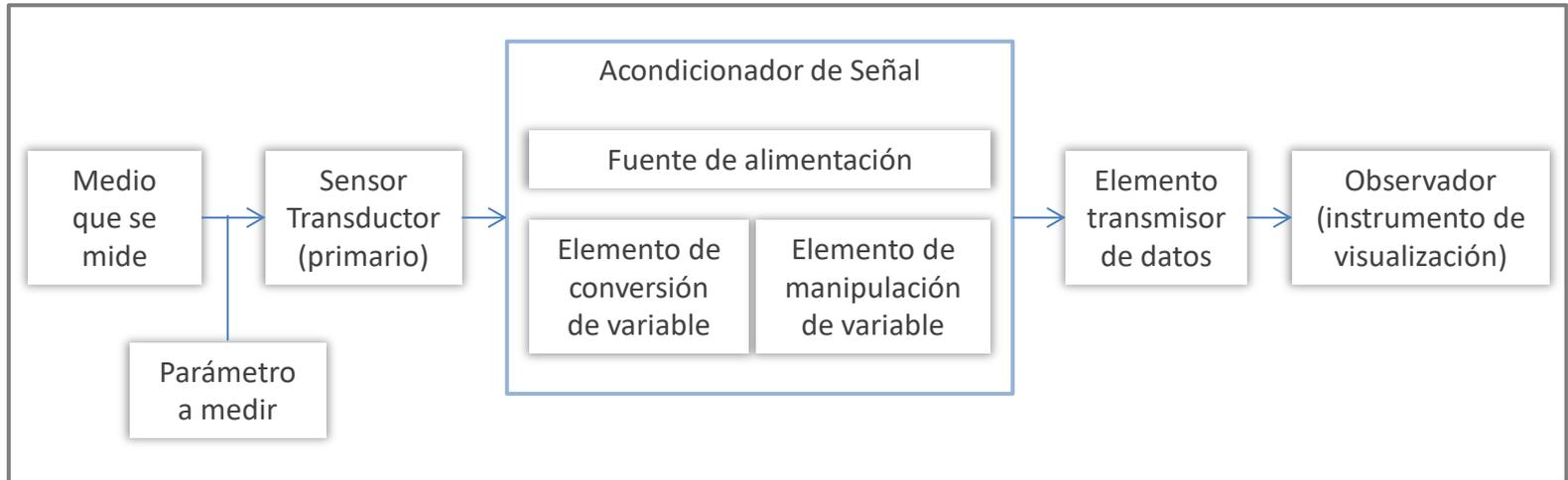
- 5.1. Introducción
- 5.2. Transmisión directa por cable
- 5.3. Transmisión por radio

2. COMPONENTES DEL SUBSISTEMA

2.1. Generalidades

En este tema se van a mostrar los fundamentos y características de los diferentes componentes del subsistema de captación, acondicionamiento y transporte de las señales, es decir, de los sensores (transductores primarios), de los elementos de acondicionamiento de las señales que de ellos proceden (elementos de conversión y de manipulación de las señales) y de transmisión de las señales (cables y radio).

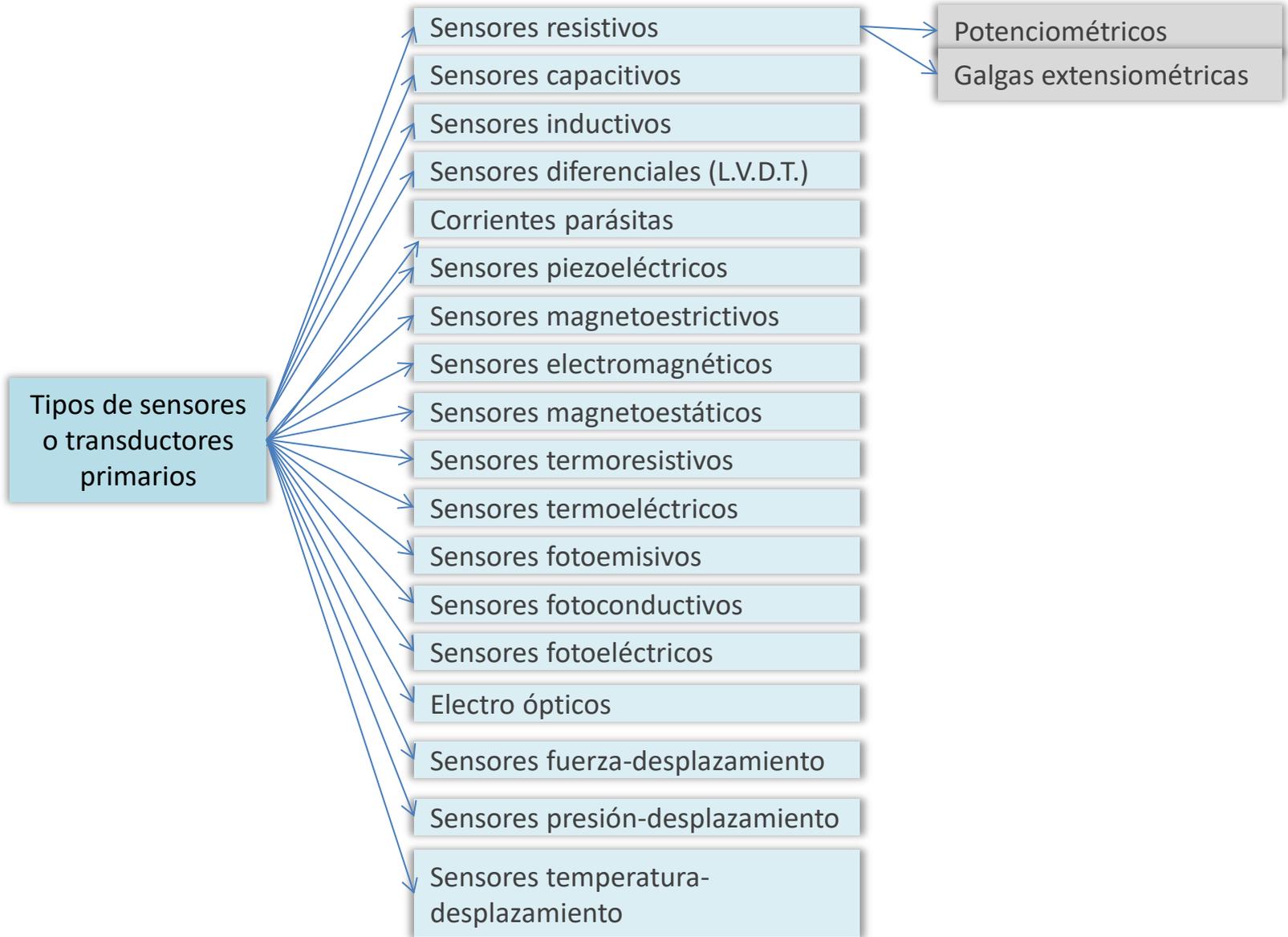
No se trata aquí de una exposición pormenorizada de los componentes reales (del mercado), sino solo de los fundamentos conceptuales comunes a todos ellos.



Esquema 8. Esquema de los componentes del subsistema de captación, acondicionamiento y transporte de señales

3. ELEMENTOS DE CAPTACIÓN

3.1. Tipos de sensores (transductores primarios)



3. ELEMENTOS DE CAPTACIÓN

3.3. Sensores capacitivos

Definición

Son los transductores basados en la propiedad de modificación de la capacidad de un condensador eléctrico cuando varía alguno de los parámetros que la definen.

$$C = \zeta_o \cdot \zeta_r \cdot \left(\frac{A}{d}\right)$$

ζ_o = permitividad eléctrica del vacío = $8,854 \cdot 10^{-10} (F/m)$

ζ_r = permitividad eléctrica del medio entre las dos placas.

A = área efectiva entre placas (m^2)

d = distancia entre placas.

Obviamente la capacidad puede variar al hacerlo ζ_r , A o d . En consecuencia cualquiera de estos parámetros puede ser utilizado como variable de entrada en un transductor capacitivo.

En cualquiera de los casos se trata de sensores de desplazamientos.

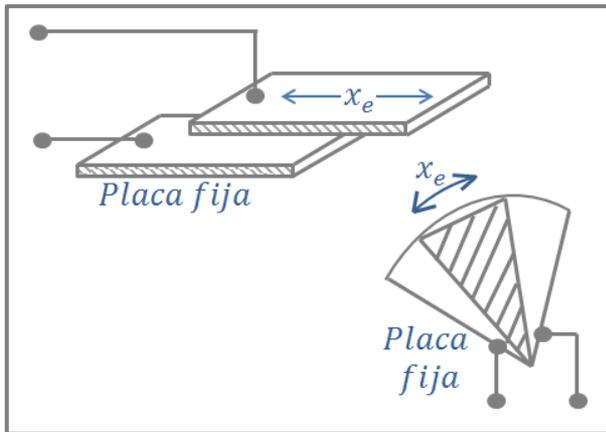


Fig. 49 Área variable

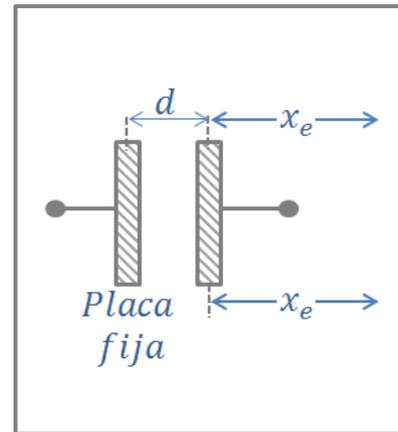


Fig. 50 Distancia variable

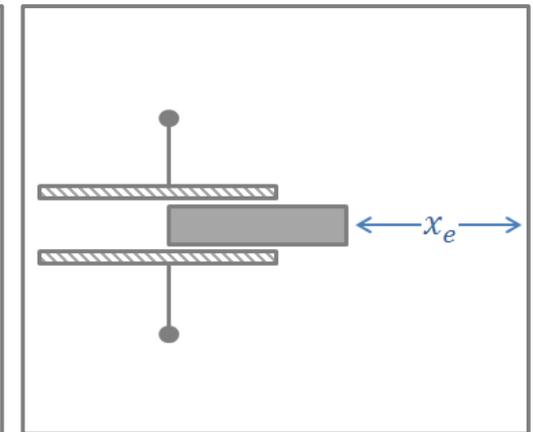


Fig. 51 Permitividad variable

3. ELEMENTOS DE CAPTACIÓN

3.3. Sensores capacitivos

Sensibilidad

Dependiendo de la variable elegida la relación entrada–salida podrá ser lineal (cuando la variable de entrada es ζ_r o A) o no lineal (hiperbólica) cuando la variable de entrada es d .

En el caso de relación entrada – salida lineal la sensibilidad dependerá de la pendiente de esta línea, que será tanto mayor cuanto mayor sea A o ζ_r

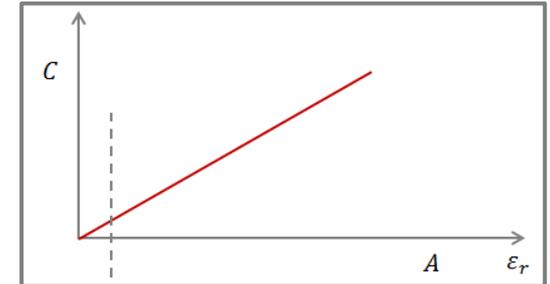


Fig. 52 Relación entrada-salida

En el caso de variar “ d ” la respuesta será casi lineal sólo para desplazamientos pequeños.

Sin embargo la sensibilidad es mayor en este caso, como se observa calculando la variación de “ C ” con “ d ”.

$$\frac{\Delta C}{\Delta d} = \zeta_o \cdot \zeta_r \cdot \left(\frac{A}{d^2} \right)$$

(Obsérvese que estos sensores son muy sensibles a la distancia entre placas ya que la misma varía con el cuadrado de la distancia).

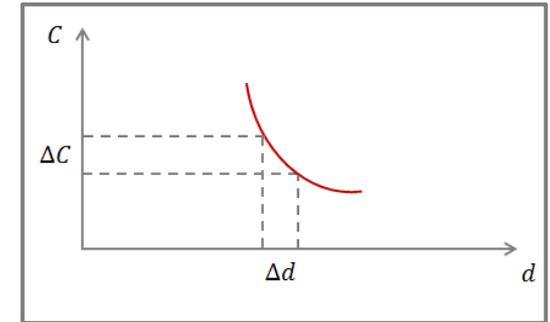
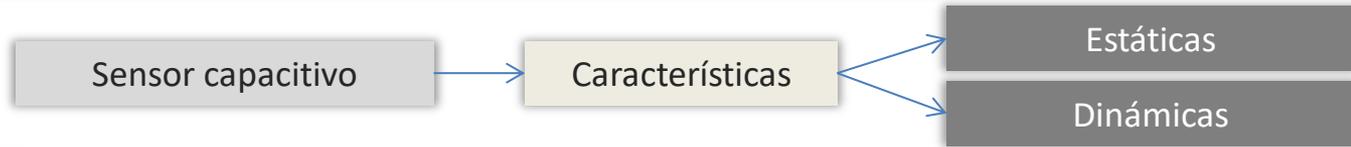


Fig. 53 Variación de la variable de entrada (d)

3. ELEMENTOS DE CAPTACIÓN

3.3. Sensores capacitivos

Características



Características estáticas

- Resolución infinita (la variable de salida varía en forma continua)
- Limitado rango de trabajo (menor en los de distancia variable, por la no linealidad)
- Presentan una precisión del orden 0.1 % SFE
- Disponen de un tiempo de respuesta menor de 50 μ s.

Características dinámicas

- Los sensores capacitivos son transductores pasivos de primer orden.

En la figura 54 se representa su respuesta en frecuencia y en la figura 55 su respuesta en fase.
(Tiempo de respuesta menor de 50 μ s)

Como se ve no dan respuesta para posicionados estáticos o muy lentos, mientras que para valores de W_e altos, se comporta de forma lineal y además el ángulo de desfase es cero.

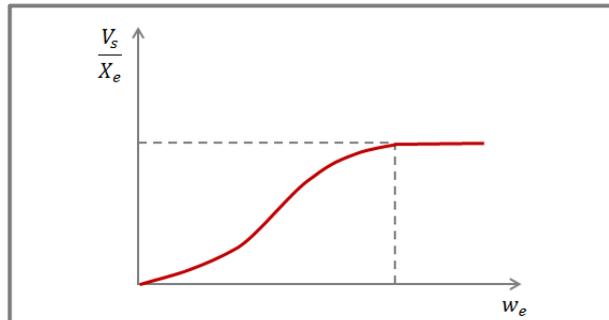


Fig. 54 Respuesta en frecuencia

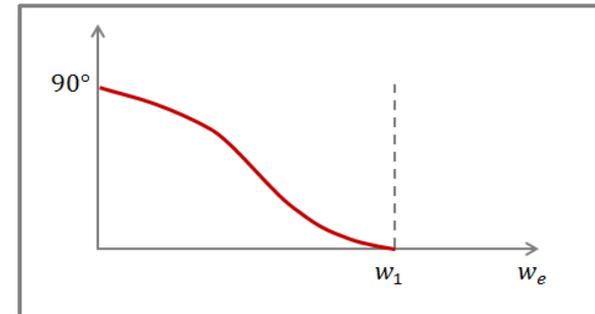


Fig. 55 Respuesta en fase

3. ELEMENTOS DE CAPTACIÓN

3.3. Sensores capacitivos

Circuito típico de montaje

Un circuito típico es el mostrado en la figura 56 (“ V_a ” puede ser una tensión continua o alterna)

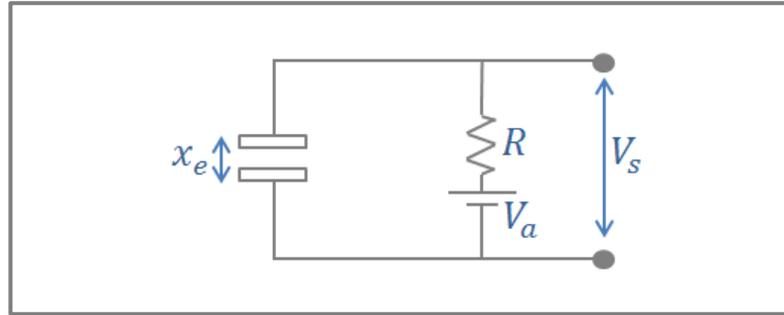


Fig. 56 Circuito de un sensor capacitivo

Cuando se alimenta el puente con corriente alterna debe aplicarse lo señalado en el recordatorio (punto 1.1) este tema

3. ELEMENTOS DE CAPTACIÓN

3.3. Sensores capacitivos

Ventajas y desventajas

Ventajas

- Este tipo de captadores también presentan una notable ventaja y es que una de las placas puede ser un cuerpo conductor cualquiera, mientras que la otra es la del transductor.

(Por eso son muy empleados como detectores de proximidad, o de desplazamiento sin contacto).

Desventajas

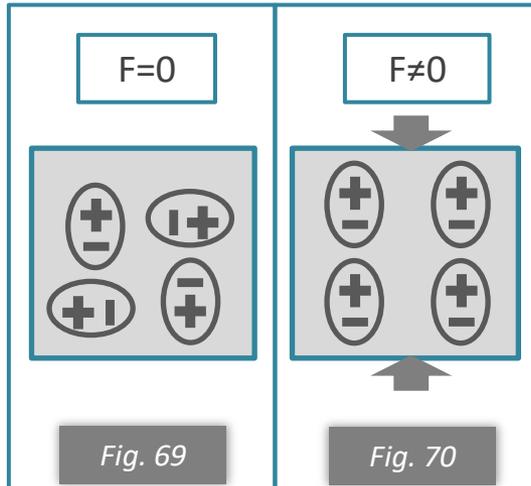
- No pueden detectar posicionados estáticos de las placas del condensador ni tampoco movimientos muy lentos de elemento móvil.

3. ELEMENTOS DE CAPTACIÓN

3.7. Sensores piezoeléctricos

Definición

Son sensores que aprovechan la propiedad de ciertos materiales de generar dentro de ellos una polarización eléctrica cuando son sometidos a una deformación. Se trata, por tanto, de sensores de desplazamiento.



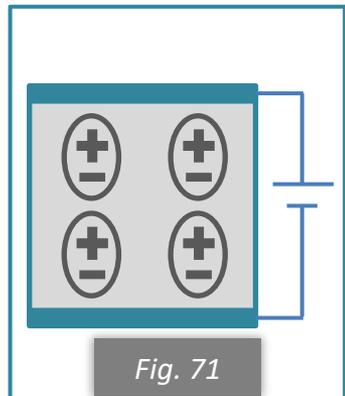
Esta polarización consiste en un reagrupamiento de las cargas eléctricas de manera que una de las caras resulta cargada positivamente y la otra negativamente, como puede apreciarse en la figura 70.

Un material conductor colocado en los bordes puede recoger las cargas eléctricas y convertirse en una corriente eléctrica

El fenómeno contrario también ocurre: estos materiales al someterlos a un campo eléctrico exterior se produce una deformación.

Un material piezoeléctrico puede responder a un variado tipo de deformaciones, como puede ser una modificación del espesor, una dilatación transversal, una cizalladura, etc.

Dado que la deformación procede de la aplicación de una fuerza (incluida la de la inercia), estos transductores transforman una energía mecánica en una energía eléctrica autogenerada, por lo cual pueden considerarse transductores activos. (El efecto contrario permite su uso como actuadores)



3. ELEMENTOS DE CAPTACIÓN

3.7. Sensores piezoeléctricos

Definición

Experimentalmente puede determinarse el valor de la carga generada en función del esfuerzo aplicado

En estos transductores pueden definirse dos constantes

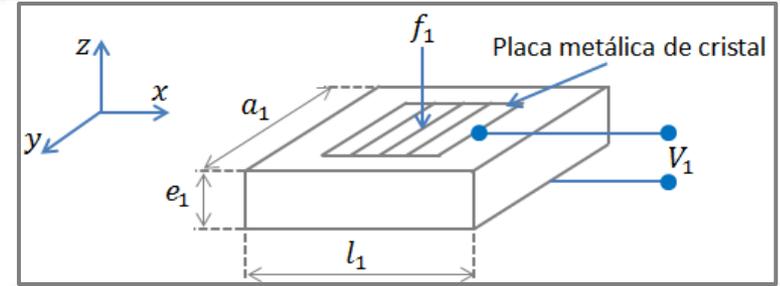


Fig. 72 Sensores piezoeléctricos

Constantes

$$g_{zz} = \frac{\text{campo producido en la dirección } OZ}{\text{esfuerzo aplicado en la dirección } OZ} = \frac{\frac{V_1}{e_1}}{\frac{f_1}{a_1 \cdot l_1}} \left(\frac{\frac{V}{m}}{\frac{N}{m^2}} \right)$$

$$g = 12 \cdot 10^{-3} \left(\frac{V}{N} \right) \text{ para el titanato de bario y } g = 50 \cdot 10^{-3} \left(\frac{V}{N} \right) \text{ para el cuarzo.}$$

$$d_{zz} = \frac{\text{carga generada en la dirección } OZ}{\text{esfuerzo aplicado en la dirección } OZ} = \frac{Q}{f_1} \left(\frac{\text{Farad}}{N} \right)$$

$$d = 1250 \cdot 10^{-11} \left(\frac{\text{Farad}}{N} \right) \text{ para el titanato de bario}$$

$$d = 4,06 \cdot 10^{-11} \left(\frac{\text{Farad}}{N} \right) \text{ para el cuarzo.}$$

“g” está en relación con “d” por medio de la constante dieléctrica ζ .

$$g_{zz} = \frac{d_{zz}}{\zeta}$$

3. ELEMENTOS DE CAPTACIÓN

3.7. Sensores piezoeléctricos

Sensibilidad

Se trata de un transductor de primer orden cuya respuesta será tanto más lineal cuanto mayor sea T (constante de tiempo). Para un desplazamiento X (señal de entrada) la tensión de salida viene dada por:

$$\frac{V_s}{X} = \frac{K' \cdot T \cdot D}{T \cdot D + 1}$$

La figura 73 representa la respuesta de este sensor a la función escalón (aplicada en 0^+ descargada en $t=T$), para diferentes valores de T (se omite el desarrollo matemático). Como se ve la respuesta es tanto mejor cuanto menor es la constante de tiempo.

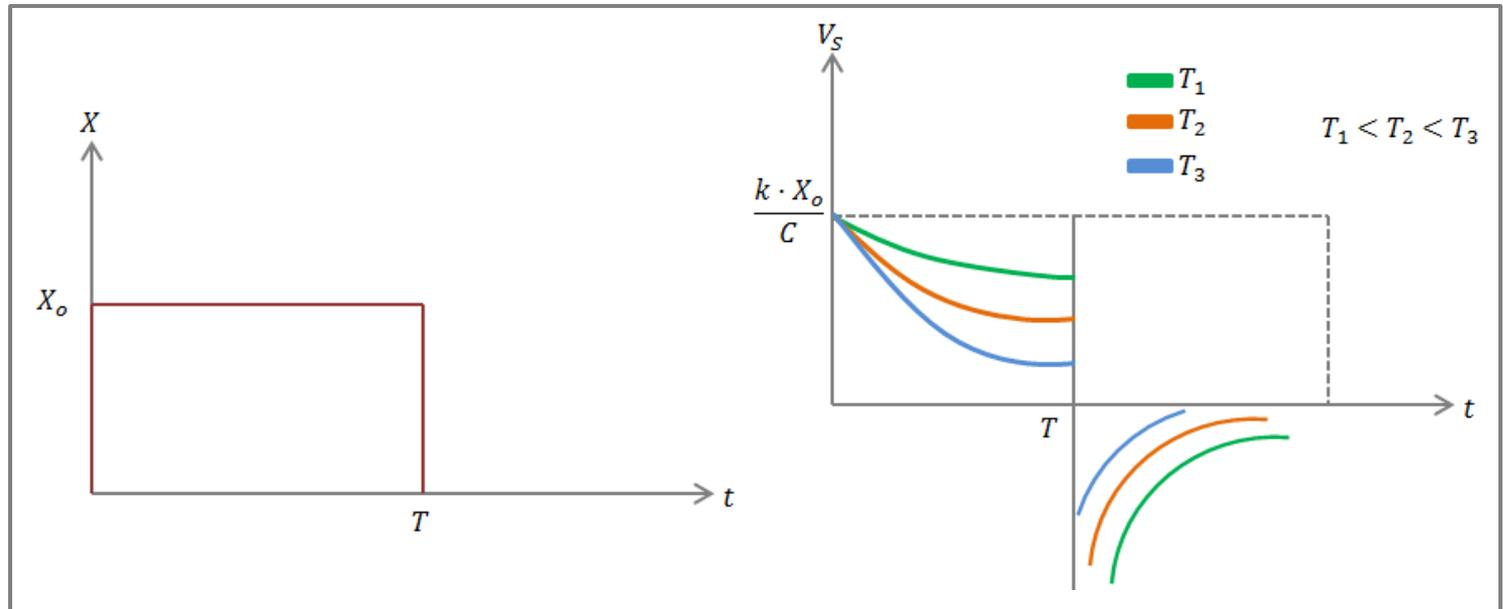


Fig. 73 Respuesta de un sensor piezoeléctrico a la función escalón

3. ELEMENTOS DE CAPTACIÓN

3.7. Sensores piezoeléctricos

Circuito típico de montaje

Los transductores de este tipo tienen una impedancia de “escape” muy elevada por lo cual la carga resultante en el sensor se descarga muy lentamente.

Pero desde que se conecte a un aparato de medida, de impedancia siempre mucho más baja, la descarga es inmediata, impidiendo la medida de deformaciones estáticas.

Esta circunstancia obliga a colocar amplificadores de carga con una muy alta impedancia de entrada para evitar tal descarga rápida (figura 74).

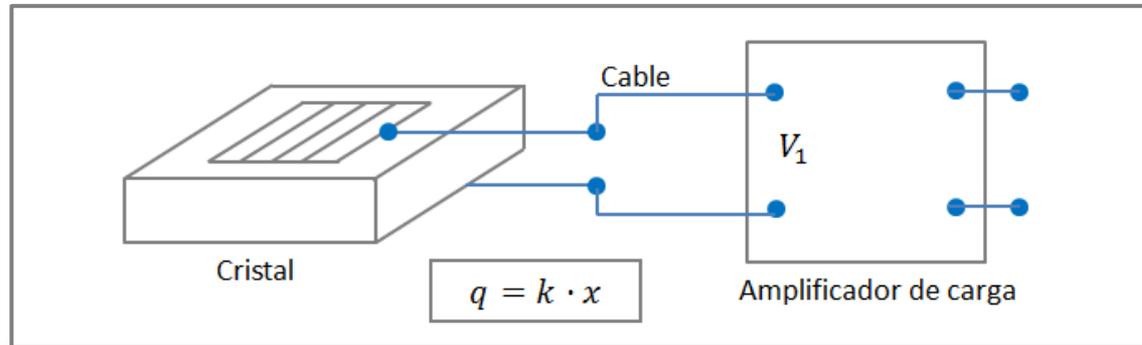
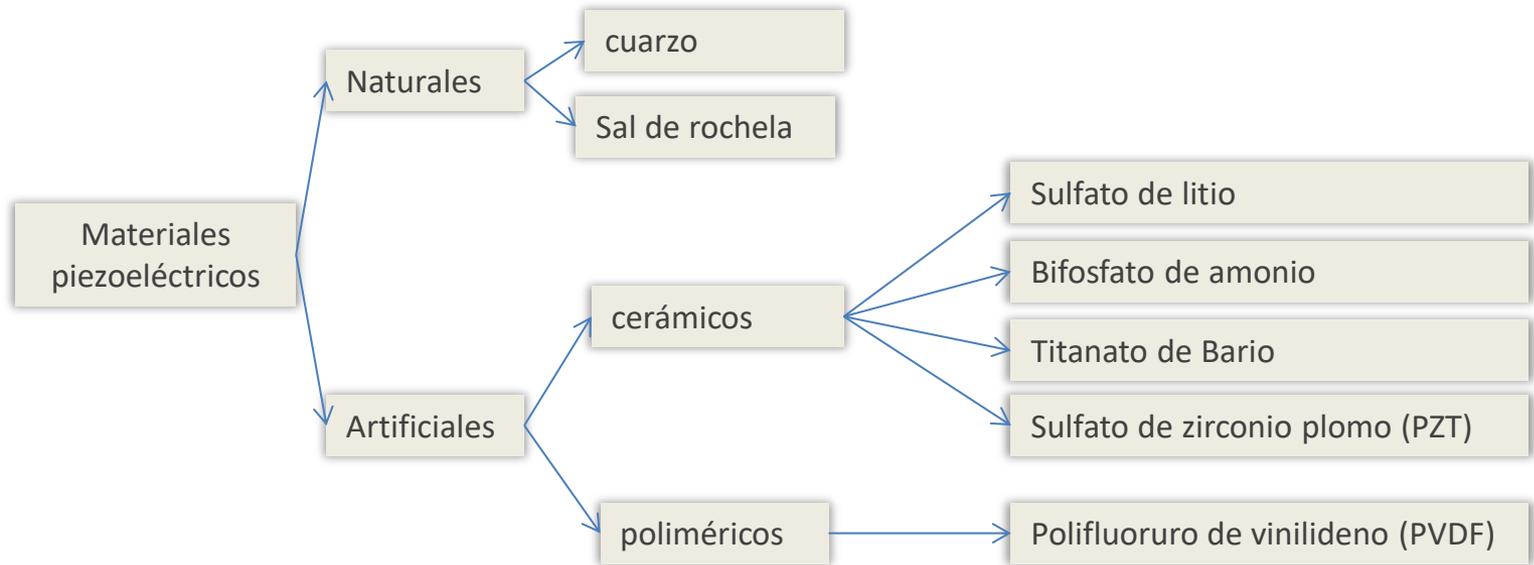


Fig. 74 Típico circuito de montaje de transductores piezoeléctricos

3. ELEMENTOS DE CAPTACIÓN

3.7. Sensores piezoeléctricos

Clasificación



Los materiales naturales mejoran sus propiedades piezoeléctricas al someterlos a un campo eléctrico intenso que les deja una polarización previa elevada.

Los sensores cerámicos se polarizan artificialmente aplicando sobre los mismos un campo eléctrico elevado a una temperatura elevada (por encima del punto de Curie a la cual los materiales pierden sus propiedades ferroeléctricas) y luego se dejan enfriar lentamente, manteniendo el campo eléctrico.

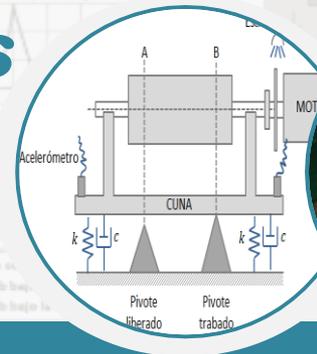
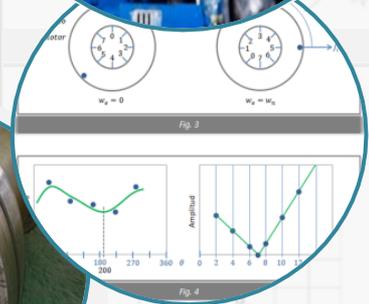
Los sensores cerámicos son rígidos y frágiles, mientras que los polímeros son flexibles y dúctiles.

ICl

MÁSTER DE MANTENIMIENTO DE MÁQUINAS

MÓDULO 4

Equilibrado y alineación aplicadas al mantenimiento de máquinas



TEMA 5 ALINEACIÓN DE EJES Y ÁRBOLES

PRÓLOGO

Este tema denominado **ALINEACIÓN DE EJES Y ÁRBOLES** es el quinto de los cinco temas de los que consta el Módulo 4 **EQUILIBRADO Y ALINEACIÓN APLICADAS AL MANTENIMIENTO DE MÁQUINAS** del Master de **MANTENIMIENTO DE MÁQUINAS** y se enmarca dentro de su primer bloque en el contexto de lograr una progresividad en el aprendizaje.

Este tema consta de cinco partes:

- En la primera se presentan los diferentes conceptos asociados al desalineamiento de máquinas
- En la segunda se exponen diferentes conceptos relativos al alineamiento de máquinas
- En la tercera se exponen diferentes métodos de alineamiento
- En la cuarta parte se exponen las tolerancias de alineamiento

CONTENIDO DEL TEMA

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Introducción

2. CONCEPTOS SOBRE DESALINEAMIENTO

2.1. Origen del desalineamiento

2.2. Tipos de desalineamientos

2.3. Consecuencias del desalineamiento

2.4. Síntomas del desalineamiento

3. CONCEPTOS SOBRE ALINEAMIENTO

3.1. Concepto de alineamiento

3.2. Aspectos previos a considerar en el alineamiento

3.3. El proceso de alineamiento

4. MÉTODOS DE ALINEAMIENTO

4.1. Alineación con galgas y regla y nivel

4.2. Métodos con reloj comparador

4.3. Métodos con laser

5. TOLERANCIAS DE ALINEACIÓN

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Introducción

Muchas máquinas están conformadas por unas unidades motrices (conductoras) y otras resistentes (conducidas o arrastradas), unidas entre sí mediante acoplamientos colocados en los extremos de sus ejes principales. (figura 103).

En todos los casos la parte motriz o conductora y la parte arrastrada o conducida se unen al correspondiente bastidor y/o bancada mediante los correspondientes sistemas de sujeción (patas de sujeción, tornillos, amortiguadores, etc.).

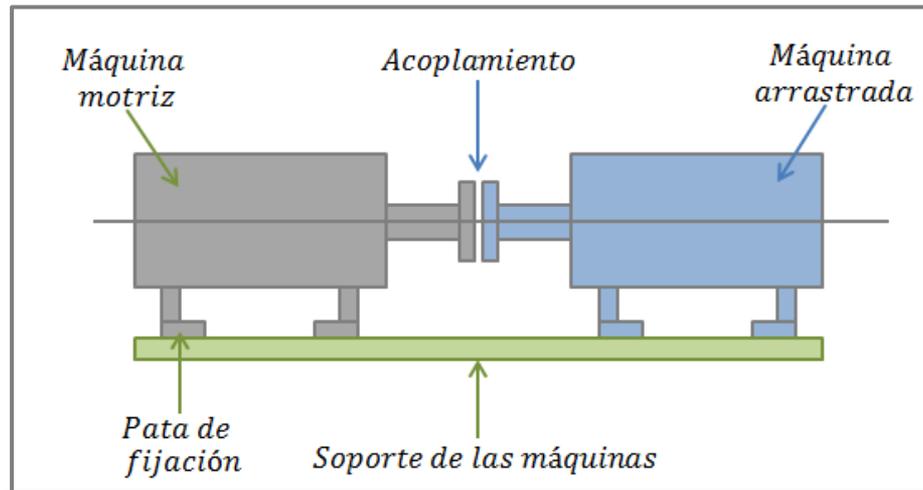


Fig. 103 Conformación de la máquina

Por razones que mas adelante se verá es muy importante que los ejes acoplados mediante el acoplamiento estén perfectamente alineados para el correcto funcionamiento del conjunto (mucho mas cuando se trate de acoplamientos rígidos que cuando estos son flexibles).

4. MÉTODOS DE ALINEAMIENTO

4.2 Métodos con reloj comparador

4.2.1. Introducción

Para el alineamiento de máquinas que giran a más de $1.500rpm$ y potencias entre $20kW$ y $1MW$, con componentes delicados como juntas, sellos, etc. y que precisan un alineamiento con un error menor de $0,1mm$, el método más usado (en el pasado) para el alineamiento es el uso de reloj comparador. Este método permite resoluciones de $0,01mm$ pero también presenta algunos problemas, como los cálculos complicados para su ejecución y posibles errores en la medida por deficiencias en el equipo utilizado, por deficiencias en su colocación y por errores humanos.

Este método de alineamiento de ejes consta de un equipo compuesto por varias partes y puede ser aplicado en diferentes modalidades: con un solo reloj comparador y medida radial y axial, con dos relojes comparadores y con tres relojes comparadores.

En los puntos siguientes de este tema se expondrán algunos de estos métodos.

NOTA

La alineación por laser ha desplazado en gran medida la alineación con reloj comparador. Sin embargo la comprensión de los conceptos que este método permite alcanzar justifica su presentación y estudio en este Master.

4. MÉTODOS DE ALINEAMIENTO

4.2 Métodos con reloj comparador

4.2.2. Equipo de medida

El equipo de medida consta del reloj comparador propiamente dicho, el sistema de soporte del mismo y el sistema de fijación al eje de una de las máquinas (figura 113).

- El reloj comparador se compone de un mecanismo de piñón y cremallera, una aguja de seguimiento unida a la cremallera, un resorte de retorno y una aguja indicadora sobre una escala. A partir de una posición intermedia de la aguja de seguimiento, cuando esta entra el resorte se comprime y la aguja del indicador gira a derechas (según las agujas del reloj, considerado como valor positivo y cuando sale el resorte se expande y la aguja del indicador gira a izquierdas (en contra de las agujas de un reloj, considerado valor negativo).
- El sistema de soporte se compone de dos barras perpendiculares entre si. Una de ellas soporta el reloj comparador y la otra esta unida al sistema de fijación al eje. Ambas barras pueden alcanzar diferentes longitudes, de acuerdo al tamaño del plato del acoplamiento y a la distancia entre este y el punto de fijación.
- El sistema de fijación al eje de las máquinas es una abrazadera cuya forma garantiza tres puntos de fijación, en un amplio rango de diámetros del mismo. Dos de los puntos los garantiza la forma de la abrazadera y el tercero es un tornillo de apriete. (Esta fijación se realiza normalmente sobre el eje de la máquina fija).

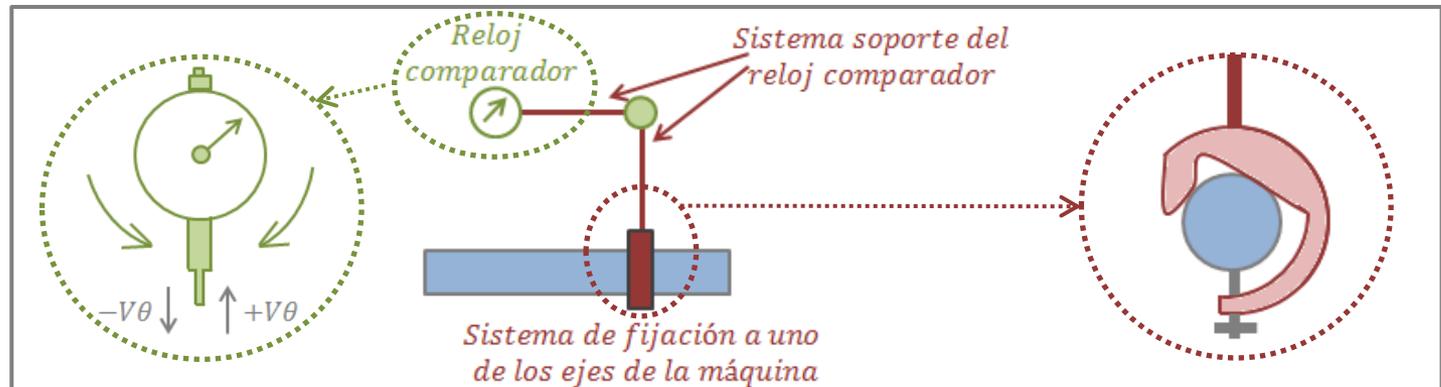


Fig. 113 Reloj comparador

4. MÉTODOS DE ALINEAMIENTO

4.2 Métodos con reloj comparador

4.2.2. Equipo de medida

Un problema que presentan estos sistemas es la diversidad de errores que con ellos pueden cometerse, entre los que destacan:

- Como la resolución del aparato está limitada a 0,01 mm se pueden cometer errores de redondeo de 0,005 mm en una lectura, lo cual puede traducirse en errores totales de 0,04 mm después de los cálculos pertinentes (figura 114a).
- Flexión de las barras, tanto de soporte del reloj como de la sujeción al eje (figura 114b).
- Excesivo juego en las uniones mecánicas (entre ambas barras y de estas con el reloj) (figura 114c).
- Posible inclinación del reloj indicador (figura 114d).
- Posible juego axial en la medida de desalineamientos angulares (figura 114e).

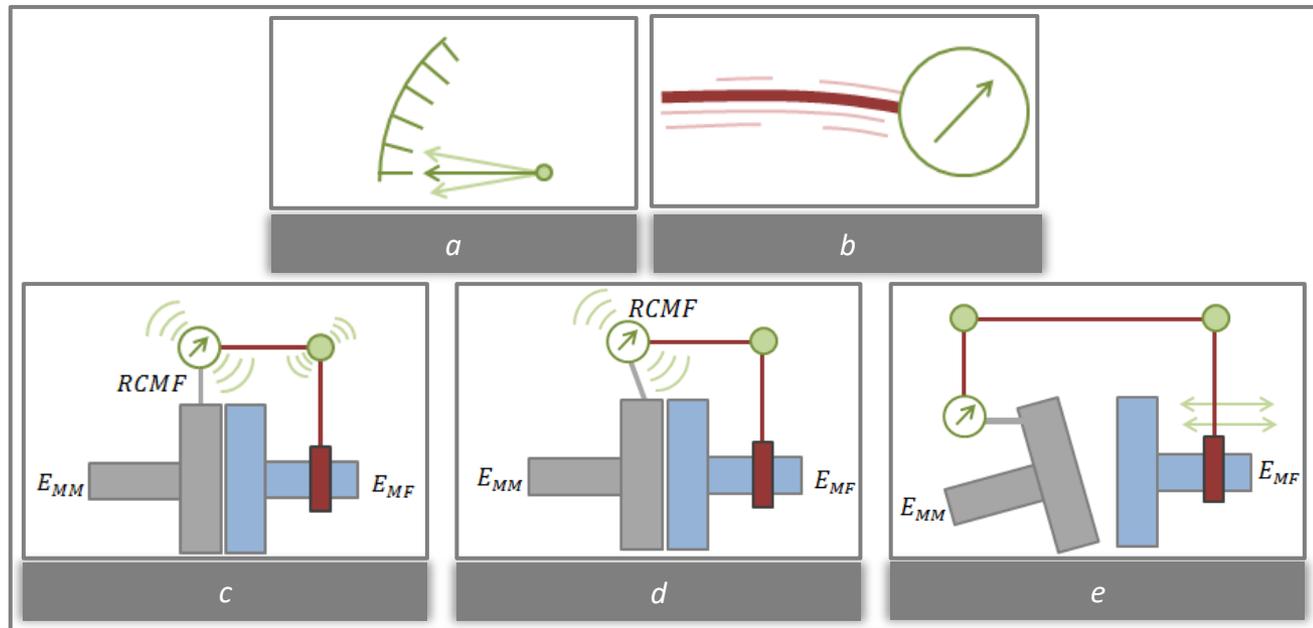


Fig. 114 Equipo de medida con reloj comparador

4. MÉTODOS DE ALINEAMIENTO

4.2 Métodos con reloj comparador

4.2.3. Conceptos introductorios

Con los relojes comparadores pueden medirse (y posteriormente corregirse) desalineamientos paralelos y angulares y en ambos casos es preciso realizar algunas consideraciones previas respecto de los valores a medir.

Primera observación

La primera observación se refiere a la interpretación de medida del desalineamiento radial o paralelo entre ambos ejes utilizando esta técnica.

En la figura 115 se presenta el eje de la máquina movable " E_{MM} " y el de la máquina fija " E_{MF} " con una distancia entre ambos " h ".

También se representa el reloj comparador fijado al eje de la máquina fija. El conjunto puede girarse (a mano) simultáneamente, manteniéndose obviamente los dos ejes en sus posiciones relativas (solo pueden girar sobre si mismos, sobre sus propios cojinetes). En este movimiento el soporte del reloj comparador, los brazos y el propio reloj giran arrastrados por el giro de la máquina fija y durante ese movimiento la aguja de seguimiento del reloj va siguiendo el perfil del plato del eje movable.

En la figura 115 se ha representado el conjunto en la posición superior (0°) y en la inferior (180°). El diámetro del plato donde se coloca el comparador es " d ".

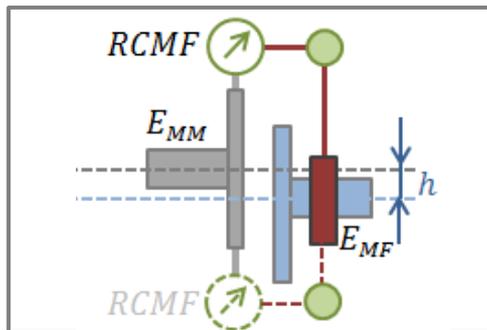


Fig. 115 Reloj comparador fijado al eje de la máquina fija

Si en la posición 0° reloj se pone a 0 (aguja de seguimiento en la posición central), cuando se encuentra en la parte inferior la aguja de seguimiento está mucho más salida que en la posición cero, indicando un valor negativo, lo que significa que el eje de la máquina movable está más alto que el de la máquina fija.

La diferencia de medida entre ambas posiciones viene dada por:

$$(d_1/2 - h) - (d_1/2 + h) = -2h$$

Por tanto la mitad de la diferencia de medidas del reloj comparador es la distancia entre los dos ejes.

4. MÉTODOS DE ALINEAMIENTO

4.2 Métodos con reloj comparador

4.2.3. Conceptos introductorios

Segunda observación

La segunda observación se refiere a como se mide el desalineamiento angular con estos relojes comparadores.

En la figura 116 se presenta el caso de desalineamiento angular θ , con el reloj comparador fijado al eje de la máquina fija y apoyado axialmente en el plato del eje de la máquina movable.

El diámetro del plato correspondiente a la posición de la aguja es d .

En la posición del dibujo, o en cualquier otra, el desplazamiento axial g viene dado por:

$$\theta = \tan^{-1} \frac{g}{d}$$

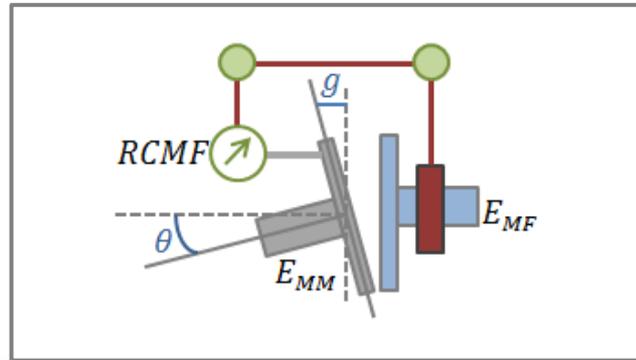


Fig. 116 Reloj comparador fijado al eje de la máquina fija y apoyado axialmente en el plato del eje de la máquina movable

4. MÉTODOS DE ALINEAMIENTO

4.2 Métodos con reloj comparador

4.2.3. Conceptos introductorios

Tercera observación

La tercera observación tiene que ver con las deformaciones que pueden sufrir los brazos de soporte del reloj comparador (flexiones) cuando la distancia entre los platos de medición es grande (como suele ocurrir en muchos acoplamientos compuestos) y que puede introducir errores importantes de la medida.

En la figura 117 se representa el reloj comparador fijado al eje de la máquina fija y en la posición superior de este, con lo cual descansa sobre el plato del acoplamiento y no estará flexado.

Si el dial se coloca en la posición 0 en ese punto al girar el conjunto 180° y pasar a la parte inferior ya no marcará "0" sino, por ejemplo, $-5\mu m$, debido a la flexión del brazo exclusivamente (al margen de lo que pudiera marcar por desalineamiento paralelo).

Esta circunstancia debe ser tenida en cuenta cuando se desee medir un desalineamiento paralelo, pues si durante la medida el reloj marca $+15\mu m$ en su posición inferior, por ejemplo, habría que restar los 5 anteriores para obtener el verdadero valor debido al desalineamiento, que sería $10\mu m$.

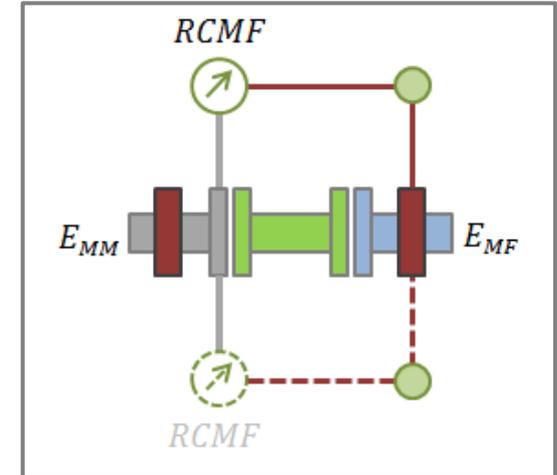


Fig. 117 Reloj comparador fijado al eje de la máquina fija y descansando sobre el plato del acoplamiento

4. MÉTODOS DE ALINEAMIENTO

4.2 Métodos con reloj comparador

4.2.3. Conceptos introductorios

Cuarta observación

La cuarta observación tiene que ver con las deformaciones derivadas de los cambios de temperatura de una (o ambas) en la máquina durante su funcionamiento (tal sería el caso de bombas que bombean fluidos a alta temperatura, por ejemplo), que producen dilataciones que deben ser tenidas en cuenta en el momento del alineamiento, por lo que no valdría un alineamiento en frío.

En estos casos la máquina a corregir es la que se encuentra sometida a calentamiento y dilataciones.

A escala global la dilatación tiene dos direcciones : una en dirección axial, que no presenta problemas a efectos de desalineamiento, y otra en dirección radial, que si es necesario corregir (La figura 118 muestra los dos casos y en particular como la dilatación radial “eleva” el eje de la máquina movable).

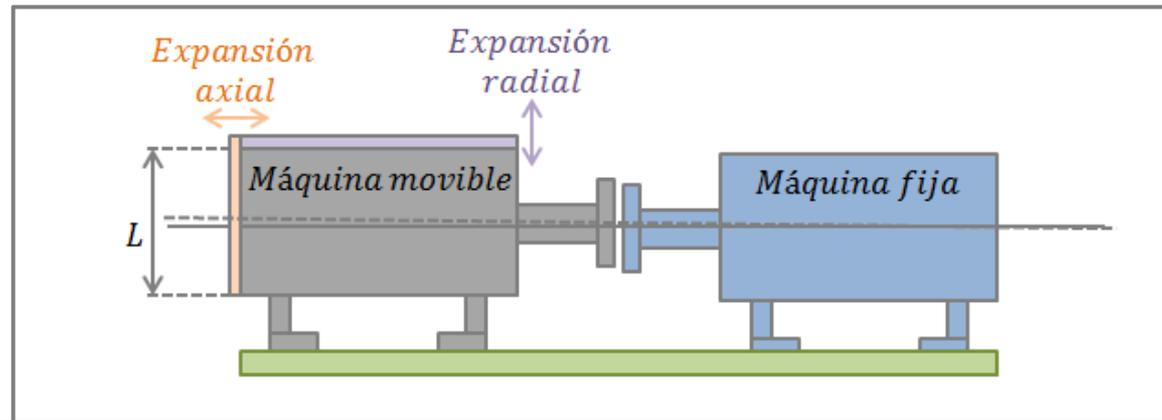


Fig. 118 Direcciones de la deformación debida a cambios de temperatura (dilatación)

4. MÉTODOS DE ALINEAMIENTO

4.2 Métodos con reloj comparador

4.2.3. Conceptos introductorios

Cuarta observación

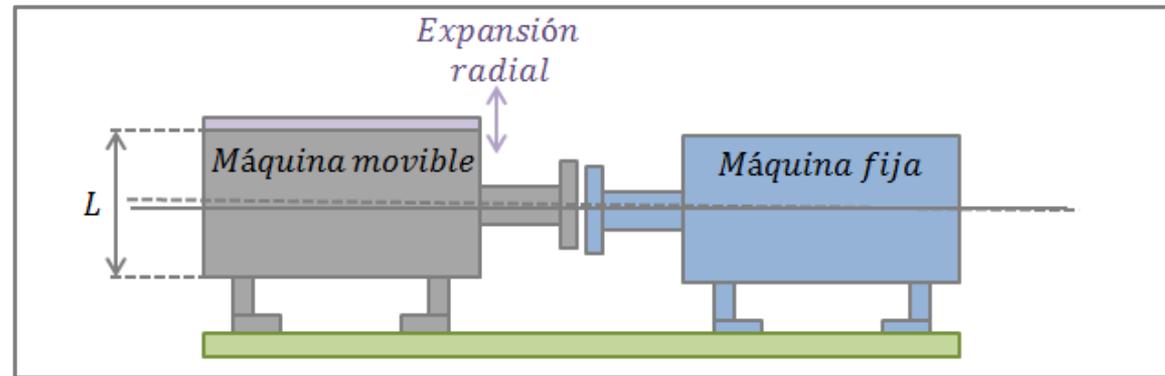


Fig. 119 Expansión vertical o radial

En el supuesto que solo la expansión vertical (Figura 119) es la considerada, si “ L ” es la altura de la máquina y “ α ” el coeficiente de dilatación térmica del material (0,0000118 para el acero) y “ Δt ” el cambio de temperatura, puede ponerse para la dilatación vertical:

$$\Delta L = (L \times \alpha) \cdot \Delta t$$

Esta dilatación vertical habría que descontarla (o añadirla) a los desalineamientos verticales medidos en frío para conseguir el alineamiento adecuado en las condiciones de trabajo de la máquina.

(Por ejemplo, para una máquina de 600mm de altura, construida con acero, una temperatura ambiente de 20° y una temperatura de trabajo de 100°, la altura alcanzada será de 0,56mm. Si en la operación de alineamiento en frío se necesita añadir un calzo de 0,7mm, al considerar la dilatación térmica solo habría que añadir uno de 0,7– 0,56 = 0,14 mm).

Un valor aproximado para calcular la expansión térmica es considerar un incremento de la longitud de 1 mm por cada metro cuando la temperatura se incrementa en 100°C, añadiendo a este resultado un 20%

4. MÉTODOS DE ALINEAMIENTO

4.2 Métodos con reloj comparador

4.2.4. Empleo de un solo reloj comparador y medidas radial y axial

En este método primero se mide el desalineamiento paralelo (radial) y luego el angular, utilizando el mismo reloj comparador.

Antes de proceder a los cálculos debe anotarse las distancias desde el plato de la máquina movable (donde se sitúa la aguja) hasta los centros de las patas: " L_{PP} " representa la distancia del plato hasta la pata próxima y " L_{PL} " la distancia a la pata lejana, tal como se ve en la figura 120.

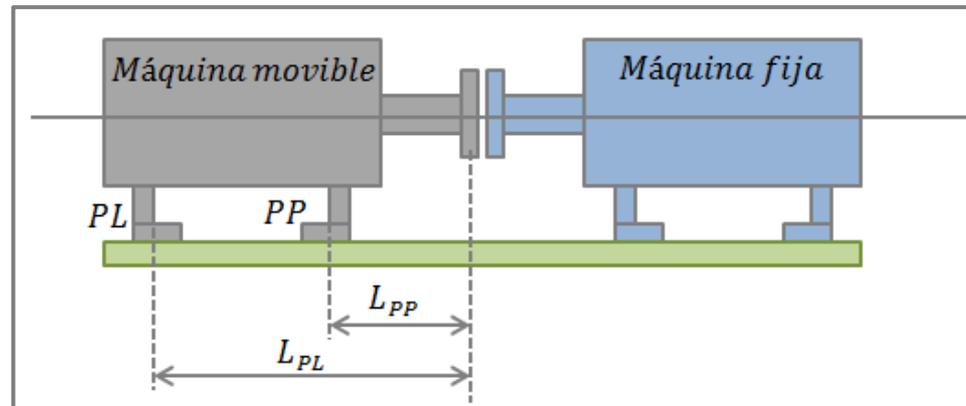


Fig. 120 Distancias necesarias para efectuar el alineamiento

NOTA

En los cálculos que siguen se va a suponer:

$$L_{PP} = 10\text{cm} \quad L_{PL} = 20\text{cm}$$

El diámetro donde se coloca el reloj comparador para medir el desplazamiento axial es $d = 10\text{ cm}$ (que puede coincidir o no con el borde del plato en el caso de medida del desalineamiento angular).

4. MÉTODOS DE ALINEAMIENTO

4.2 Métodos con reloj comparador

4.2.4. Empleo de un solo reloj comparador y medidas radial y axial

Para medir el desalineamiento radial se coloca el reloj comparador como se ve en la figura 121 (fijo al eje de la máquina fija), poniendo la aguja en la parte superior del plato de la máquina movable (12 horas del reloj o 0°) y marcando el indicador 0.

A partir de esa posición se van girando manualmente ambos ejes y anotando la posición que marca la aguja del reloj en los tres cuadrantes restantes: 90° o derecha, 180° o abajo, 270° o izquierda.

Se tienen así cuatro valores para el desplazamiento radial, como se muestra en la figura 121 (en milésimas de milímetro μm).

(El valor negativo -5 en la posición 90° indica que la aguja del indicador ha salido, lo cual supone que en esa posición el eje de la máquina movable está desplazado hacia la izquierda respecto del de la máquina fija).

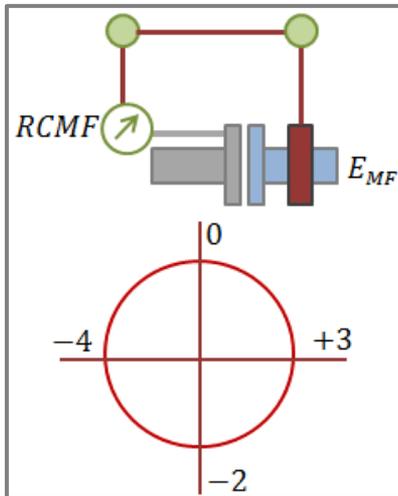


Fig. 122 Medida del desalineamiento axial

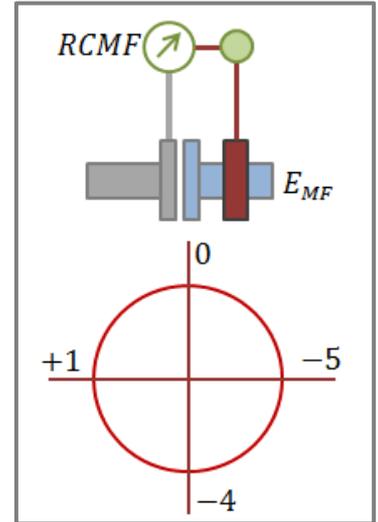


Fig. 121 Medida del desalineamiento radial

Para medir el desalineamiento angular se coloca el reloj comparador como se ve en la figura 122 (contra la cara del plato), a una distancia arbitraria que define el diámetro d y se procede del mismo modo, obteniendo así cuatro lecturas (distancias axiales) representadas en la figura 122.

(El valor negativo -4 en la posición de 270° indica que el indicador ha salido, lo cual supone que en esa posición los platos están más separados que en la posición 0°).

4. MÉTODOS DE ALINEAMIENTO

4.2 Métodos con reloj comparador

4.2.4. Empleo de un solo reloj comparador y medidas radial y axial

Como se señaló anteriormente primero se corrige el desequilibrio en el plano vertical y luego en el horizontal. A su vez, primero se corrige el desalineamiento paralelo (radial) y luego el angular.

a) Corrección en el plano vertical

a.1) Corrección del desalineamiento paralelo

De acuerdo a los datos tomados el desalineamiento paralelo en el plano vertical (0° y 180°) vale:

$$\frac{(-4) - 0}{2} = -2\mu m$$

Por tanto han de quitarse $2\mu m$ de ambas patas de la máquina movable.

a.2) Corrección del desalineamiento angular

El desplazamiento axial en este caso (entre las posiciones 0° y 180°) es:

$$g = 0 - (-0,002)cm = +0,002cm$$

Con un diámetro de colocación de la aguja de 10 cm se tendrá para el valor del ángulo de inclinación de la máquina movable respecto de la máquina fija θ :

$$\theta = \text{tag}^{-1} \frac{0,002}{10} = 0,0012^\circ$$

Como se ve en la figura 123 este desalineamiento angular obliga a elevar la pata próxima una distancia " z_p " y la pata lejana " z_L " para corregir el desequilibrio.

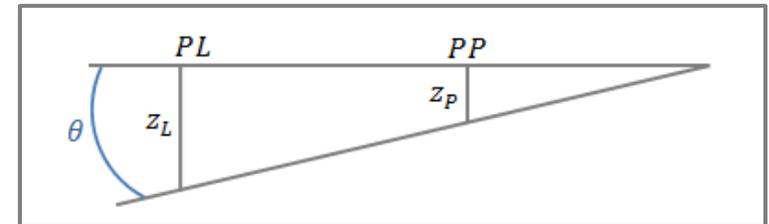


Fig. 123 Esquema 1

4. MÉTODOS DE ALINEAMIENTO

4.2 Métodos con reloj comparador

4.2.4. Empleo de un solo reloj comparador y medidas radial y axial

a) Corrección en el plano vertical

a.2) Corrección del desalineamiento angular

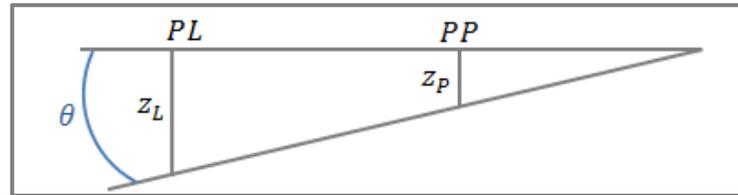


Fig. 123 Esquema 2

Al ser el ángulo tan pequeño puede sustituirse el desplazamiento vertical z por el arco s ($s = r \times \theta$), quedando:

$$z_1 = 10 \times 0,12 = 1,2 \mu m$$

$$z_2 = 20 \times 0,12 = 2,4 \mu m$$

Que son las cantidades que habría que añadir en cada pata.

a.3) Corrección total en el plano vertical

- En la pata próxima:
 - Debido al desalineamiento radial habría que quitar $2\mu m$.
 - Debido al desalineamiento angular habría que añadir $1,2\mu m$.
 - En resumen, deben quitarse $0,8\mu m$ en esta pata.
- En la pata lejana:
 - Debido al desalineamiento radial habría que quitar $2\mu m$.
 - Debido al desalineamiento angular habría que añadir $2,4\mu m$.
 - En resumen, deben añadirse $0,4\mu m$ en esta pata.

MÓDULO 5

Teoría de fiabilidad aplicada al mantenimiento de máquinas

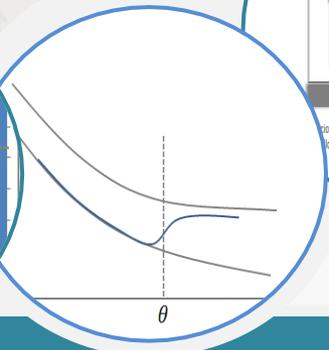


... y tiempo medio de reparación
 ... fiabilidad efectuado hasta ahora no se ha considerado lo que supone la sustitución o por reparación del elemento dañado, aspecto fundamental del mantenimiento de máquinas.
 ... cualquier elemento de máquinas sometido a fallos y reparaciones se tendrá una sucesión de "tiempos de funcionamiento" (TF) y una sucesión de "tiempos de reparación" (TR).



... y tiempo de reparación se tendrá:
 los (MTBF):

$$MTBF = \frac{\sum_{i=1}^n T_i \cdot F_i}{\sum_{i=1}^n F_i}$$



TEMA 1

TEORÍA DE FIABILIDAD APLICADA AL MANTENIMIENTO DE MÁQUINAS

Este tema denominado TEORÍA DE FIABILIDAD APLICADA AL MANTENIMIENTO DE MÁQUINAS es el único de que consta el MÓDULO 5 FIABILIDAD del Master de MANTENIMIENTO DE MÁQUINAS y se enmarca dentro de su primer bloque CONCEPTOS PREVIOS en el contexto de lograr una progresividad en el aprendizaje.

Este tema consta de nueve partes:

- En la primera se parte se realiza una introducción de la aplicación de la fiabilidad al mantenimiento de máquinas
- En la segunda parte se realiza un recordatorio de los histogramas de fallos
- En la tercera se realiza una aplicación de los métodos estadísticos al análisis de fallos en máquinas
- En la cuarta parte se introduce el concepto de fiabilidad relativo a los elementos de máquinas
- En la quinta parte se extiende el concepto de fiabilidad al conjunto de elementos de una máquina
- En la sexta parte se introduce el concepto de mantenibilidad en elementos de máquinas
- En la séptima parte se extiende el concepto de mantenibilidad al conjunto de elementos de una máquina
- En la octava parte se introduce el concepto de disponibilidad de una máquina
- En la novena parte se aplican los conceptos anteriores al mantenimiento de máquinas

1. INTRODUCCIÓN AL DESEQUILIBRIO DE MECANISMOS

1.1. Introducción

2. HISTOGRAMAS DE FALLOS EN ELEMENTOS DE MÁQUINAS

2.1. Distribución de frecuencias de fallos

2.1.1. Tabla de registro de fallos

2.1.2. Distribución de frecuencia de fallos

2.2. Distribución de tasas de fallos

2.2.1. Tabla de tasa de fallos

2.2.2. Distribución de tasa de fallos

3. FUNCIONES ESTADÍSTICAS APLICADAS AL FALLO DE ELEMENTOS DE MÁQUINAS

3.1. La función de densidad de fallos

3.1.1. Concepto de función de densidad de fallos

3.1.2. Funciones estadísticas de la densidad de fallos

3.2. La función de tasa de fallos

3.2.1. Concepto de función de tasa de fallos

3.2.2. Funciones estadísticas de la tasa de fallos

3.3. Resumen de las funciones estadísticas de fallos

4. FIABILIDAD EN ELEMENTOS DE MÁQUINAS

4.1. Conceptos de fiabilidad (reliability) y de in fiabilidad.

4.2. Relación entre diferentes funciones asociadas a los fallos de elementos de maquinas

4.3. Funciones estadísticas de fiabilidad, in fiabilidad y vida media

5. FIABILIDAD EN MÁQUINAS (SISTEMAS CON VARIOS ELEMENTOS)

- 5.1. Fiabilidad de sistemas con elementos en serie, en paralelo y mixtos
- 5.2. Efecto de un elemento sobre la fiabilidad del conjunto

6. MANTENIBILIDAD DE ELEMENTOS DE MÁQUINAS

- 6.1. Introducción
- 6.2. Densidad y tasa de reparaciones y tiempo medio de reparación (MTTR)

7. MANTENIBILIDAD DE MÁQUINAS (SISTEMAS CON VARIOS ELEMENTOS)

- 7.1. Mantenibilidad de máquinas con elementos en serie y en paralelo
- 7.2. Aspectos prácticos de la mantenibilidad

8. DISPONIBILIDAD DE ELEMENTOS DE MÁQUINAS

- 8.1. Conceptos de disponibilidad instantánea, de misión y límite

9. UNIDADES PRÁCTICAS EN EL ESTUDIO DE LA FIABILIDAD EN MÁQUINAS

- 9.1. Introducción
- 9.2. Tiempo medio entre fallos (MTBF), tiempo medio para el fallo (MTTF), tiempo medio de reparación (MTTR) y disponibilidad media

10. INTRODUCCIÓN A LAS TEORÍAS DE LA FIABILIDAD APLICADAS A LA GESTIÓN DEL MANTENIMIENTO DE MÁQUINAS

- 10.1. Introducción
- 10.2. Sustitución frente a reparación
- 10.3. Generalidades sobre costes y fiabilidad
- 10.4. Fiabilidad y selección de estrategias de mantenimiento

4. FIABILIDAD EN ELEMENTOS DE MÁQUINAS

4.1. Concepto de funciones de fiabilidad (reliability) y de in fiabilidad. Relaciones

Dada la función de densidad de fallos $f(t)$ de la figura 29, la probabilidad de que se produzca un fallo en el intervalo de tiempo $0 - t_1$ se denomina in fiabilidad y viene dado por.

$$F(t_1) = \int_0^{t_1} f(t) \cdot dt$$

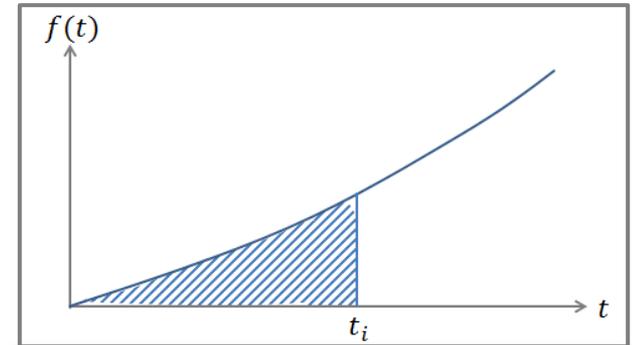


Fig. 29 Función de densidad de fallo

Por tanto para todos los valores de t puede definirse la “función de in fiabilidad” $[F(t)]$ (Failure) (o Desconfiabilidad) representada en la figura 30. Es una curva adimensional cuyo valor para $t = 0$ es 0 y para $t = \infty$ se hace 1 representa, para cada valor de t , la probabilidad de fallo entre 0 y t .

En términos generales estas curvas adoptan una forma como la de la figura 21. La probabilidad de fallo es baja al principio, luego sube mas o menos rápidamente y finalmente se estabiliza en valores próximos a 1 (todos fallan).

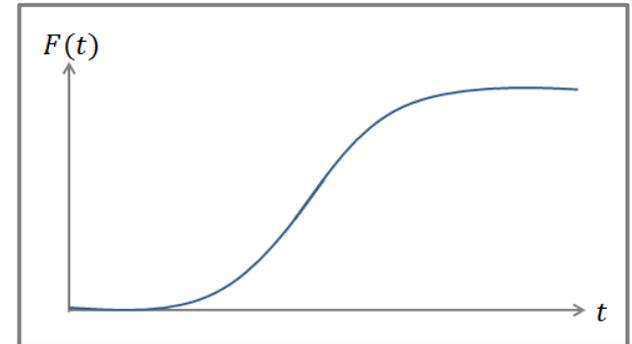


Fig. 30 Función de in fiabilidad

4. FIABILIDAD EN ELEMENTOS DE MÁQUINAS

4.1. Concepto de funciones de fiabilidad (reliability) y de in fiabilidad. Relaciones

A partir de la función de in fiabilidad $F(t)$ puede definirse la función de fiabilidad $[R(t)]$ (Reliability) (o Confiabilidad $C(t)$) la cual representa la probabilidad de supervivencia (no fallo) de los elementos de maquina del conjunto considerado en intervalo de tiempo " $0 \rightarrow t_i$ ". Obviamente:

$$R(t) = 1 - F(t)$$

En la figura 31 se han representado ambas funciones. En ella se ve que la probabilidad de fallo es la misma que de no fallo y vale 0,5.

Como puede comprobarse:

$$\begin{aligned} R(0) &= 1 \text{ y } R(\infty) = 0 \\ F(0) &= 0 \text{ y } F(\infty) = 1 \end{aligned}$$

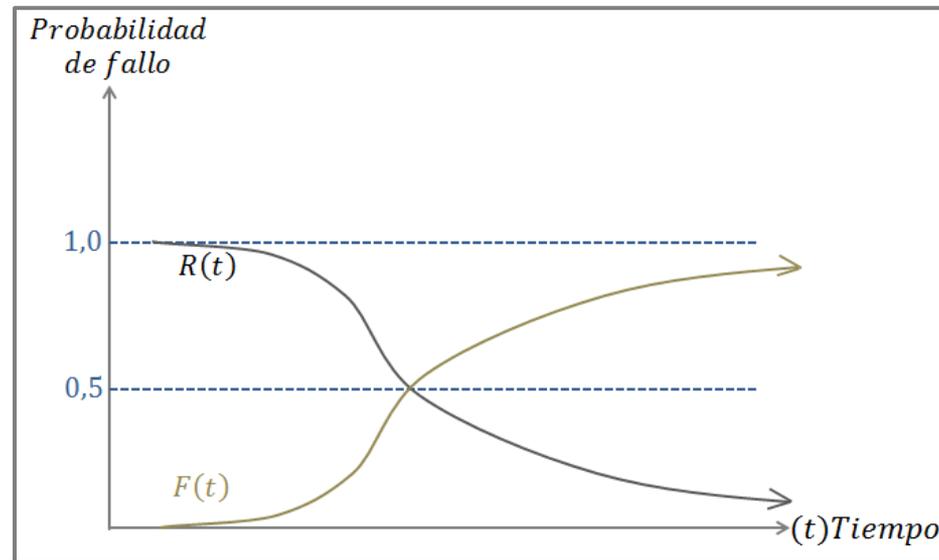


Fig. 31 Funciones de fiabilidad e in fiabilidad

4. FIABILIDAD EN ELEMENTOS DE MÁQUINAS

4.2. Relación entre diferentes funciones asociadas a los fallos de elementos de maquinas

Relación entre la in fiabilidad “ $F(t)$ ” y la densidad de fallos “ $f(t)$ ”:

$$F(t_1) = \int_0^{t_1} f(t) \cdot dt$$

Relación entre la fiabilidad “ $R(t)$ ” y la densidad de fallos “ $f(t)$ ”:

$$R(t_1) = \int_{t_1}^{\infty} f(t) \cdot dt$$

Relación entre las funciones de in fiabilidad “ $F(t)$ ” y fiabilidad “ $R(t)$ ”:

$$\begin{aligned} R(t) + F(t) &= 1 \\ R(t_1) &= 1 - F(t_1) \text{ o} \\ F(t_1) &= 1 - R(t_1) \end{aligned}$$

Relación entre la densidad de fallos “ $f(t)$ ” y la fiabilidad “ $R(t)$ ”:

De la definición de densidad de fallo puede ponerse:

$$f(t) = \frac{F(t + dt) - F(t)}{dt} = \frac{dF(t)}{dt} = -\frac{R(t + dt) - R(t)}{dt} = -\frac{dR(t)}{dt}$$

Luego la densidad de fallos es la derivada respecto del tiempo de la función de fiabilidad (pendiente de esta curva en cada punto)

4. FIABILIDAD EN ELEMENTOS DE MÁQUINAS

4.2. Relación entre diferentes funciones asociadas a los fallos de elementos de maquinas

Relación entre la tasa de fallos “ $z(t)$ ” y la fiabilidad “ $R(t)$ ”:

De la definición de la tasa de fallos (probabilidad por unidad de elementos supervivientes en “ $t = t_i$ ” de que se produzca un fallo por unidad de tiempo “ dt ” en ese instante “ t_i ”) se tiene:

$$z(t) = \frac{f(t)}{R(t)} ; z(t) = \frac{-dR(t)}{R(t)dt}$$

se observa que para $R(t) = 0$ $z(t) = \infty$ independientemente que la densidad de fallos sea alta o baja en ese instante.

Otros parámetros de interés:

- Vida media:

$$\theta = \int_0^{\infty} t \cdot f(t)dt = \int_0^{\infty} R(t)dt$$

(momento de primer orden, respecto del origen del tiempo, de la densidad de fallos)

- Desviación típica:

$$\sigma^2 = \int_0^{\infty} (t - \theta)^2 f(t)dt$$

(momento de segundo orden respecto de “ θ ” de la densidad de fallos)

4. FIABILIDAD EN ELEMENTOS DE MÁQUINAS

4.3. Funciones estadísticas de fiabilidad, in fiabilidad y vida media

Distribución exponencial

En esta función

$$f(t) = \lambda \cdot e^{-\lambda t}$$

Por tanto la función de in fiabilidad vale.

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t}$$

Y la función de fiabilidad es

$$R(t) = e^{-\lambda t}$$

La tasa de fallos vale en este caso:

$$z(t) = \lambda = \frac{f(t)}{R(t)} \rightarrow f(t) = R(t) \cdot \lambda = \lambda \cdot e^{-\lambda t}$$

La vida media vale:

$$\theta = \int_0^{\infty} R(t) dt = \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda}$$

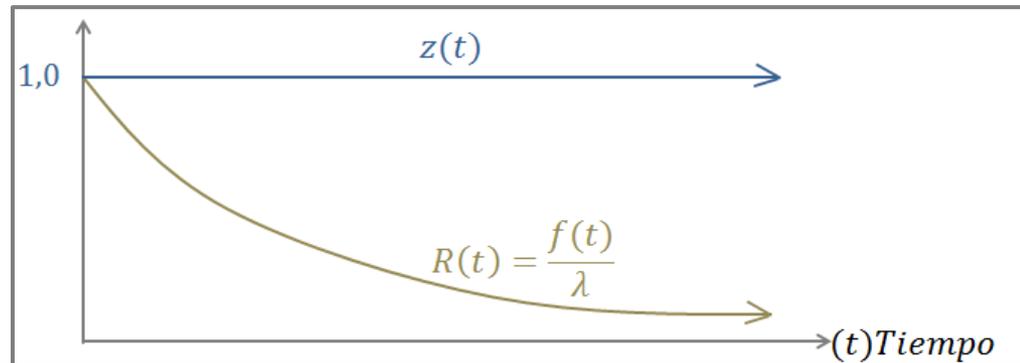


Fig. 32 Función de fiabilidad y tasa de fallos

9.1. Introducción

En todo lo anterior se ha visto los conceptos y funciones relativas a la fiabilidad, in fiabilidad, confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad, basados en valores estadísticos y formulaciones matemáticas relativamente complejas y que precisan manejar un gran número de datos.

En la práctica, para salvar tales complejidades y obtener valores mas intuitivos para todas estas variables, se recurre a formulaciones mas simples, basadas en valores medios pero que no por ello dejen de tener validez.

Así se tienen:

- Tiempo medio entre fallos (MTBF) (Mean Time Between Failure):
- Tiempo medio para el fallo (MTTF)
- Tiempo medio de reparación (MTTR) (Mean Time To Repair):
- Disponibilidad media

9.2. Tiempo medio entre fallos, tiempo medio de reparación y disponibilidad media

Cualquier máquina sometida a fallos y reparaciones se tendrá una sucesión de “tiempos de funcionamientos” (TF) y una sucesión de “tiempos de reparación” (TR) (figura 41)



Fig. 41 Sucesión de tiempos de funcionamiento y tiempos de reparación

Para n tiempos de funcionamiento se tendrá:

Tiempo medio entre fallos (MTBF) (Mean Time Between Failure):

$$MTBF = \frac{\sum_{i=1}^n TF_i}{n} = \sum_{i=1}^n \frac{TF_i}{n}$$

También si “ T_o ” es el tiempo total de operación de la máquina, “ T_{PNP} ” es el tiempo total de paradas no programadas (debidas a fallos) y “ N_{TF} ” es el tiempo medio entre fallos puede ponerse:

$$MTBF = \frac{T_o - T_{PNP}}{N_{TF}}$$

(Esta expresión no determina exactamente el tiempo entre fallos puesto que no considera los tiempos de reparación)

9. UNIDADES PRÁCTICA EN EL ESTUDIO DE LA FIABILIDAD EN MÁQUINAS

9.2. Tiempo medio entre fallos, tiempo medio de reparación y disponibilidad media

Tiempo medio para el fallo (MTTF) (Mean Time To Failure):

Si n es el número de elementos de la máquina (susceptibles de fallos), T_0 es el tiempo total de operación y $N_{T(i)}$ el número de fallos de cada elemento se tendrá:

$$MTTF = \frac{n \cdot T_0}{\sum_{i=1}^n N_{T(i)}}$$

(En ciertos casos el MTTF puede ser igual a la vida media θ)

Tiempo medio de reparación (MTTR) (Mean Time Task Repare):

$$MTTR = \sum_{i=1}^n \frac{TR_i}{n}$$

Si T_{TR} es el tiempo total de reparación y N_{TR} el número total de reparaciones, se tendrá:

$$MTTR = \frac{T_{TR}}{N_{TR}}$$

NOTA

Dada la complejidad de las operaciones de mantenimiento en la práctica se recurre a definir “duraciones probables” en que se ejecutarán con éxito las reparaciones de los fallos de un elemento, por ejemplo:

$MTTR_5 \equiv$ Tiempo en que probablemente se conseguirá el 5% de los casos

$MTTR_{90} \equiv$ Tiempo en que probablemente se conseguirá el 90% de los casos

MÓDULO 6

Módulo de tipos y origen de fallos en elementos de máquinas y mecanismos



TEMA 7

FALLOS EN CORREAS Y POLEAS

PREÁMBULO

Este tema denominado FALLOS EN CORREAS Y POLEAS es el séptimo de los quince temas de los que consta el Módulo 6 TIPO Y ORIGEN DE FALLOS EN ELEMENTOS DE MÁQUINAS Y MECANISMOS del Master de MANTENIMIENTO DE MÁQUINAS y se enmarca dentro de su segundo bloque CUERPO CENTRAL DE CONOCIMIENTOS SOBRE EL MANTENIMIENTO DE MÁQUINAS en el contexto de lograr una progresividad en el aprendizaje.

Este tema consta de dos partes:

- En la primera, la introducción, se realiza un recordatorio sobre la composición, materiales, fabricación, esfuerzos aplicables, etc. de las correas y poleas
- En la segunda se presenta un cuadro de fallos típicos en correas y poleas fuertemente estructurado (causas de los mismos, efectos sobre el elemento y consecuencias finales) atendiendo a su origen (errores de diseño, de fabricación, de montaje, de operación, etc.)

CONTENIDO DEL TEMA

1. INTRODUCCIÓN

- 1.1. Generalidades
- 1.2. Definición, formas y dimensiones de correas y poleas
- 1.3. Cinemática de las correas y poleas
- 1.4. Materiales y procesos de fabricación de correas y poleas
- 1.5. Elementos conexiónados
- 1.6. Solicitaciones de correas y poleas (directas e indirectas)

2. FALLOS PROPIOS DE CORREAS Y POLEAS

- 2.1. Fallos por errores de diseño
- 2.2. Fallos por incorrecta elección del material
- 2.3. Fallos por incorrecta fabricación del elemento
- 2.4. Fallos por errores en el montaje
- 2.5. Fallos por incorrectas condiciones de servicio y mantenimiento
- 2.6. Fallos en condiciones normales de servicio

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Generalidades

Aún cuando los mecanismos genéricos de fallos son aplicables a cualquier elemento de máquina, es obvio que el fallo de un elemento de máquina concreto depende, en gran medida, del mecanismo del que formen parte, de cómo se conforman sus pares cinemáticos y de las uniones de unos con otros.

En el caso de correas y poleas sus fallos dependen de las acciones que actúan sobre los mismos así como aquellas otras que proceden de otros elementos y mecanismos con los que se encuentren en contacto directo, como pueden ser los ejes y árboles y las conexiones a los mismos.

El conocimiento de los fallos en correas y poleas es clave para el mantenimiento de las máquinas que los incorporan (además de los estudios de fiabilidad y el rediseño en su caso).

NOTA

Los fallos en estos elementos presentan una casuística muy amplia y un tratamiento exhaustivo de los mismos sobrepasa los objetivos trazados en este master.

Por ello solo se presentan los fallos mas usuales y significativos, bajo una fuerte estructuración, de modo que se facilita la comprensión de aquellos otros fallos que han quedado fuera de esta exposición.

En el Tema 2 del Módulo 9 se aplican los conocimientos que se ven en este tema al mantenimiento de máquinas por análisis de sus vibraciones

1. INTRODUCCIÓN

1.2. Definición, formas y dimensiones

Definiciones

Las correas y poleas son elementos de máquinas encargados de transmitir la rotación (con una cierta potencia) entre dos árboles (paralelos o no), por medio de la fuerza de rozamiento generada entre la polea y la correa (excepto en las correas dentadas (timing) en que la transmisión se asegura por empuje).

Formas y dimensiones

Fundamentalmente son tres tipos de correa y poleas; las correas y poleas planas (poco usadas en la actualidad), las correas y poleas V (de gran uso, y sobre la que se centrará el estudio) y las correas y poleas dentadas (de uso cada vez más extendido).

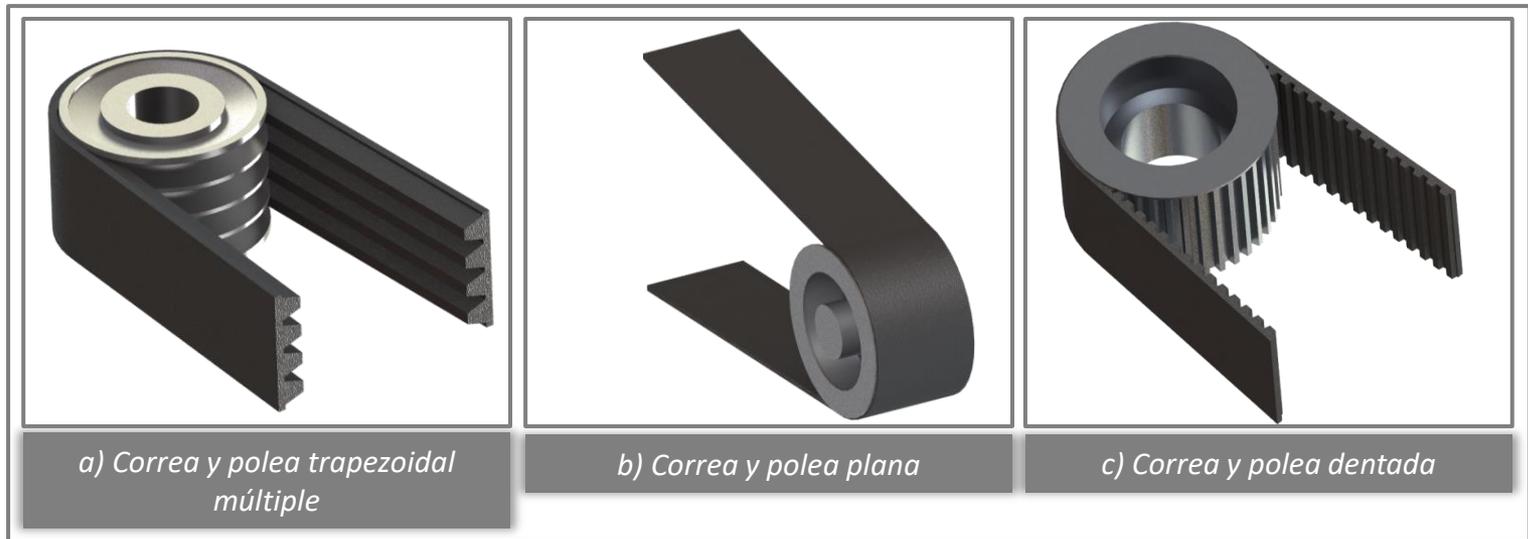


Fig. 150 Tipos de correas y poleas

1. INTRODUCCIÓN

1.2. Definición, formas y dimensiones

Formas y dimensiones

Las correas trapezoidales se fabrican en forma aislada o en bloques, como se ve en la figura 151. Todas ellas constan de un conjunto de alambres de acero embebidos en material flexible que les da la forma exterior.

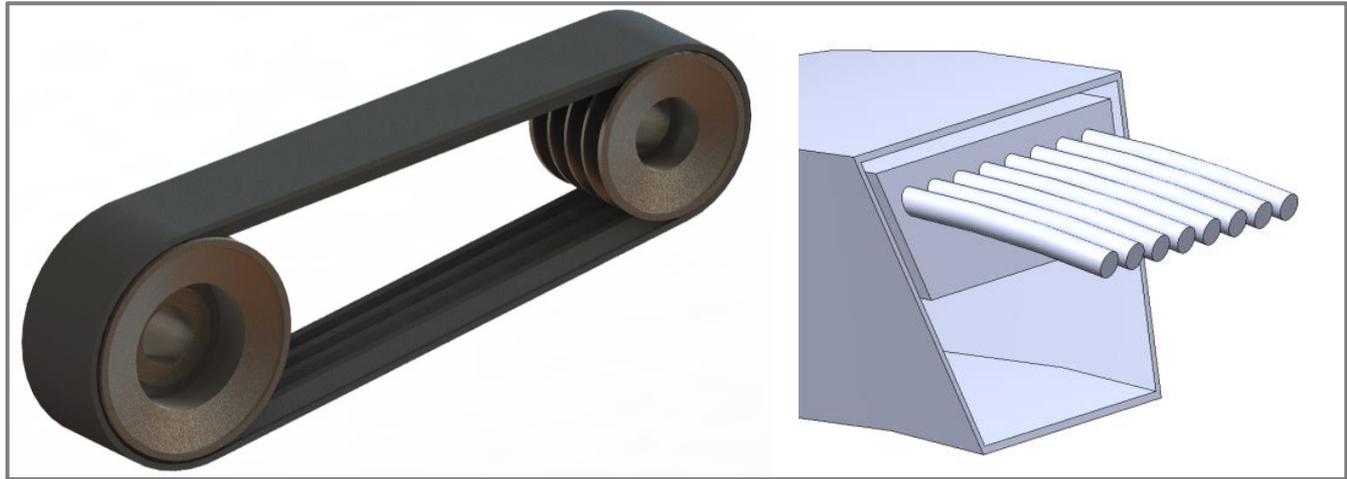


Fig. 151 Correa trapezoidal y detalle de su sección

1. INTRODUCCIÓN

1.3. Cinemática de las correas y poleas

En un mecanismo de cadena la relación de transmisión vale:

$$\frac{w_3}{w_2} = \frac{D_2}{D_3} = \frac{z_2}{z_3}$$

Si se considera el espesor e de la correa (especialmente en correas planas) $R_{p2} = R_2 + e / 2$

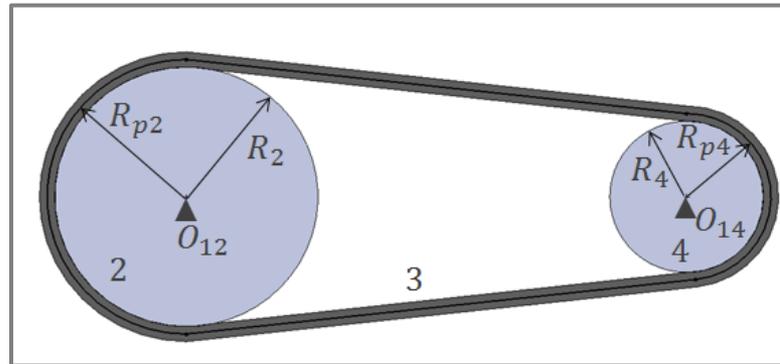


Fig. 152 Cinemática de correas y poleas

NOTA

En correas sometidas a fuertes tensiones se produce el fenómeno de deslizamiento por alargamiento con lo que la expresión mas exacta de la relación de transmisión sería (la justificación se verá mas adelante):

$$j = \frac{R_2 + \frac{e}{2}}{R_4 + \frac{e}{2}} \cdot (1 - \varphi)$$

1. INTRODUCCIÓN

1.4. Materiales y procesos de fabricación

Materiales

Las correas V y dentadas se construyen a base de alambres de acero embebidos en tejidos impregnados de goma, neopreno, nylon, etc.

Las poleas normalmente se construyen de acero, fundición o aluminio.

Fabricación

Este tipo de correas se fabrican en casas especializadas, con magnitudes normalizadas (siempre “cerradas”). Ello implica que no se diseñan para aplicación específica, sino que se eligen las adecuadas en función de los requerimientos exigidos (las ruedas si se diseñan y construyen ad hoc, muchas veces).

NOTA

Por las razones anteriores no se van a analizar en este tema los aspectos relativos a las causas de fallos que tienen que ver con el diseño, materiales y fabricación de estos elementos.

1. INTRODUCCIÓN

1.5. Elementos conexiónados

En este tipo de mecanismos los únicos elementos conexiónados son los ejes o árboles a los que se unen las poleas.

Las uniones pueden realizarse mediante un ajuste con interferencia (apriete) o mediante chavetas.

1. INTRODUCCIÓN

1.6. Solicitaciones

Fuerzas transmitidas en este mecanismo

La potencia que se transmite en este mecanismo se debe en exclusiva al rozamiento que se genera entre la correa y las poleas, por lo cual esta debe ser dotada de una cierta tensión inicial para conseguir la fuerza de rozamiento adecuada. Además la fuerza total de rozamiento dependerá del ángulo abrazado por la correa sobre las poleas.

En la figura 153 se representan las fuerzas actuantes en una polea y correa con un coeficiente de rozamiento entre ambas " μ " y un ángulo abrazado " α ". " F_r " es la fuerza de rozamiento actuante en un tramo " ds ", y " T " y " $T + dT$ " las tensiones de la correa a ambos lados.

Para un ángulo abarcado α la relación entre la tensión en el ramal cargado " T_c " y el ramal descargado " T_d " vale:

$$\frac{T_c}{T_d} = e^{\mu\alpha}$$

(A " $e^{\mu\alpha}$ " se le denomina m por simplificar las expresiones matemáticas)

Precisamente para aumentar el ángulo abarcado siempre se deja el ramal descargado en la parte superior, o se coloca un rodillo tensor, como se ve en la figura 154

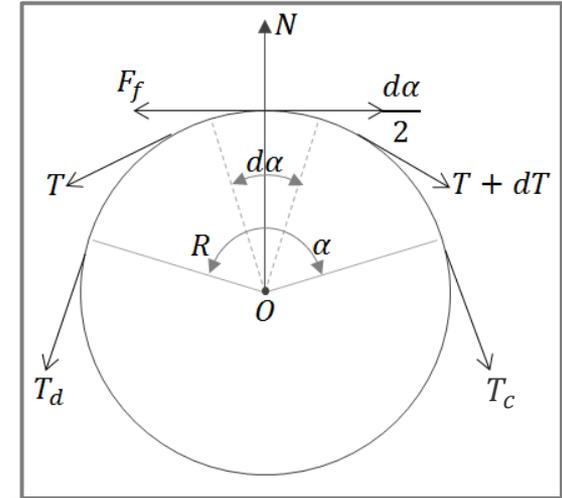


Fig. 153 Fuerzas en el mecanismo

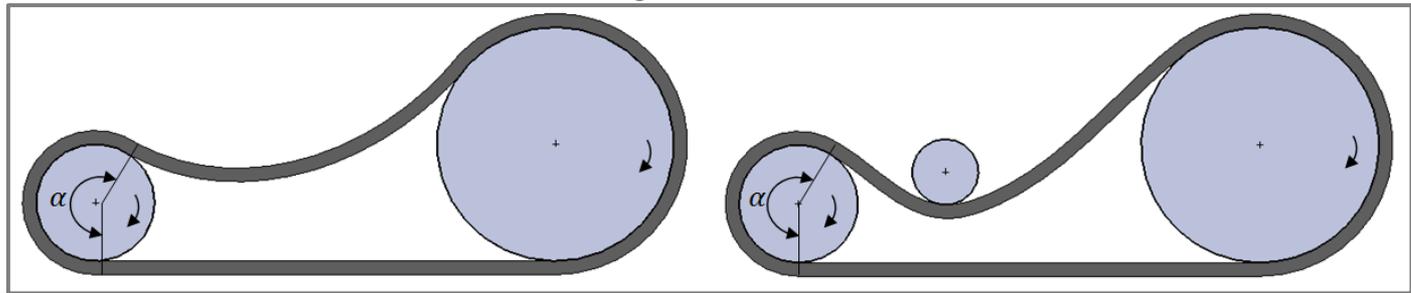


Fig. 154 Ramal descargado y rodillo tensor

1. INTRODUCCIÓN

1.6. Solicitaciones

Fuerzas transmitidas en este mecanismo

La figura 155 representa una polea de radio “ R ” transmitiendo un par “ $M = F \cdot R$ ” a la correa.

Debe cumplirse que: $T_c \cdot R = F \cdot R + T_d \cdot R$

O lo que es igual: $F = T_c - T_d$

Expresiones que también pueden escribirse:

$$F = \frac{T_c(m - 1)}{m} \quad \text{o} \quad F = T_d(m - 1)$$

Al poner en marcha este mecanismo con una cierta tensión inicial “ T_i ” la tensión en el ramal cargado pasa de “ T_i ” a “ T_c ” y la del ramal descargado de “ T_i ” a “ T_d ”.

Por tanto se cumple que: $T_c - T_i = T_i - T_d$

De estas expresiones y de las anteriores se obtienen los valores de la fuerza “ F ” que puede transmitirse con una tensión inicial dada “ T_i ” (y para un ángulo abrazado α y un coeficiente de rozamiento “ μ ”), así como la tensión “ T_i ” que ha de aplicarse para transmitir una fuerza “ F ”.

$$F = 2 \cdot T_i \cdot \frac{m - 1}{m + 1} \qquad T_i = \frac{F}{2} \cdot \frac{m + 1}{m - 1}$$

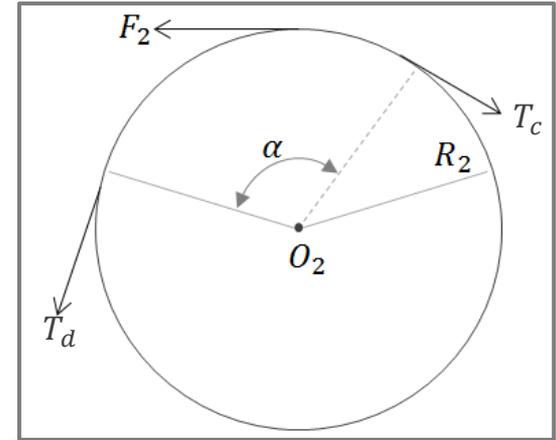


Fig. 155 Fuerzas en el mecanismo

1. INTRODUCCIÓN

1.6. Solicitaciones

Fuerzas transmitidas en este mecanismo

Como se ha visto cualquier punto de la correa pasa de una tensión máxima cuando se encuentra en el ramal cargado a otra tensión mínima cuando se encuentre en el ramal descargado.

Debido al comportamiento elástico de las correas (en el supuesto que sigan la ley de Hooke) esto supone que la correa se alarga en el ramal cargado y luego se acorta en el descargado, ocurriendo esta transición en las zonas de la misma situada sobre las poleas.

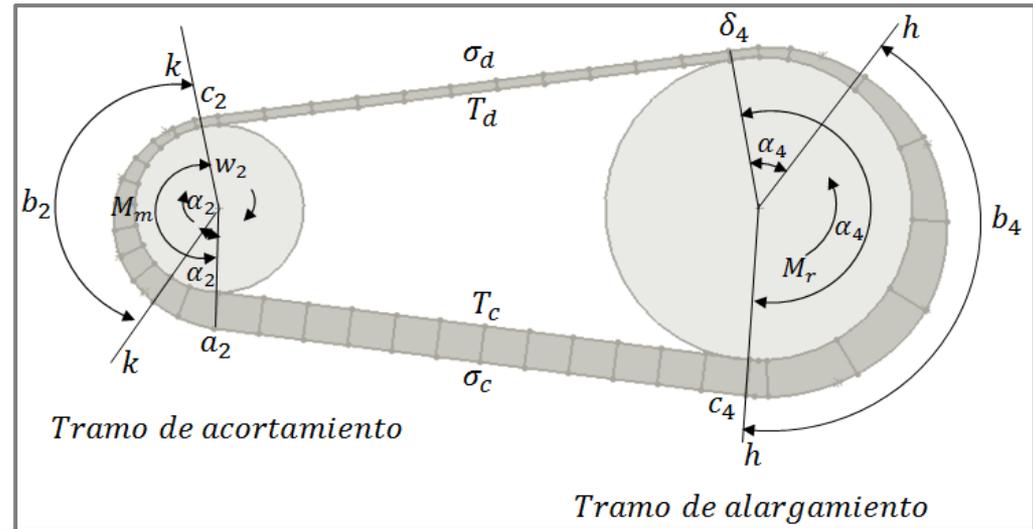


Fig. 156 Tramos de acortamiento y alargamiento

En la figura 156 se observa en la polea de la izquierda (que se supone la polea motora) que en un tramo de esta (definido por el ángulo " α'_2 ") la tensión en la correa decae pero permanece pegada a la polea, sin deslizar, debido a las fuerzas de rozamiento (tramo de clavado o stick). A partir de ahí la fuerza de rozamiento es incapaz de compensar el acortamiento de la correa y esta desliza sobre la polea (resbalamiento por acortamiento), lo cual ocurre en el tramo abarcado por el ángulo " α_2 ".

Lo mismo, pero en sentido contrario, ocurre en la polea arrastrada produciéndose en el tramo correspondiente a " α_4 " un resbalamiento por alargamiento. De ahí procede el ligero retraso en la relación de velocidades mostrado en el análisis cinemático.

Cuando el tramo de clavado se hace cero se produce el deslizamiento de la correa sobre la polea (patinamiento) que como se ve es un fenómeno distinto al patinamiento por una tensión inicial mas baja de la necesaria.

1. INTRODUCCIÓN

1.6. Solicitaciones

Fuerzas transmitidas en este mecanismo

En el caso de correas trapezoidales el rozamiento entre esta y las poleas se realiza en las caras laterales como se ve en la figura 157.

La fuerza normal “ N ” se convierte en dos componentes normales a las caras “ N' y N' ” de valores:

$$\frac{N}{2} \cdot \operatorname{sen}\left(\frac{\beta}{2}\right)$$

(Siendo β el ángulo que forman las caras de la polea).

La fuerza de rozamiento total será en este caso:

$$F_r = \mu \cdot N' + \mu \cdot N' = \mu \cdot \frac{N}{2} \cdot \operatorname{sen}\left(\frac{\beta}{2}\right) + \mu \cdot \frac{N}{2} \cdot \operatorname{sen}\left(\frac{\beta}{2}\right)$$

$$F_r = \frac{\mu \cdot N}{\sin\left(\frac{\beta}{2}\right)}$$

Como $\operatorname{sen}\left(\frac{\beta}{2}\right)$ siempre es menor de uno la fuerza de rozamiento que se consigue en este tipo de correas y poleas es mucho mayor que en las correas planas, por lo que se puede ir a ángulos α abrazados menores y por tanto distancias entre poleas mas cortas y mayores relaciones de transmisión (del orden de 1:10)

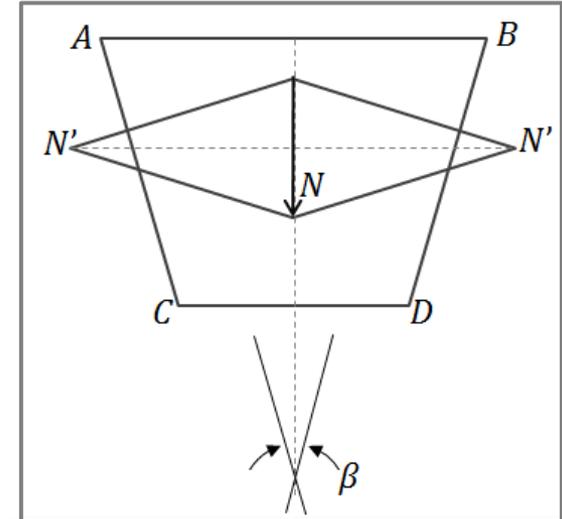


Fig. 157 Rozamiento entre una correa trapezoidal y su polea

1. INTRODUCCIÓN

1.6. Solicitaciones

Tensiones en correas y poleas

Por la acción de los esfuerzos existentes en los ramales de la correa (el cargado y descargado) las correas se ven sometidas a importantes tensiones variables de tracción. Así mismo el doblado (flexión) de la misma sobre la polea origina nuevas tensiones variables de tracción en la parte exterior y de compresión en la interior. Como consecuencia de ambos efectos las correas están sometidas a importantes tensiones de fatiga.

En el caso de correa trapezoidal a los efectos anteriores se suman los deslizamientos en las caras de la correa contra la polea, tanto en su entrada como en la salida de la misma, que da lugar a desgastes laterales (de la correa y de las poleas)

NOTA

Al doblarse la correa trapezoidal sobre la polea el lado AB en la figura anterior se encoje, mientras que el lado CD se ensancha (tanto mas cuanto menor sea el diámetro de la polea) . Por ese motivo el ángulo β nunca es igual en la correa que en la polea y de ahí la necesidad de ajustarse a las instrucciones del fabricante a la hora de la selección adecuada de la correa para cada polea.

1. INTRODUCCIÓN

1.6. Solicitaciones

Tensiones debidas a los elementos conexcionados

Al ser los árboles y ejes los únicos elementos conexcionados con las poleas las tensiones que estos transmiten dependen del sistema de unión entre estas y árbol o eje y las posibles deformaciones de estos (flexión) o los fallos en sus apoyos.

En las figuras se presentan algunas de estas tensiones inducidas sobre las poleas (en realidad sobre los cubos de las mismas) que pueden derivar en excentricidades en las poleas.

En cuanto a las deformaciones en el eje o árbol estas pueden traducirse en desviaciones de las poleas de su plano de giro y excentricidades entre ellas.

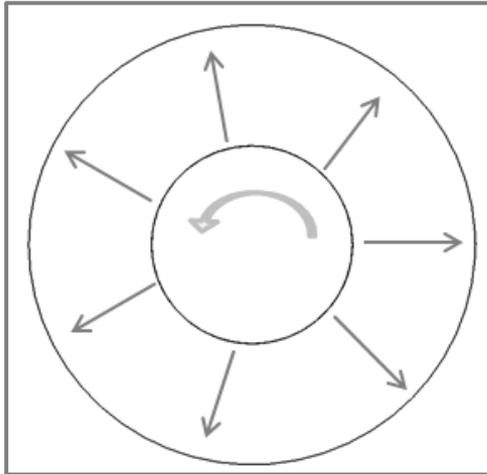


Fig. 158 Tensiones en poleas debidas a su calado al eje por presión

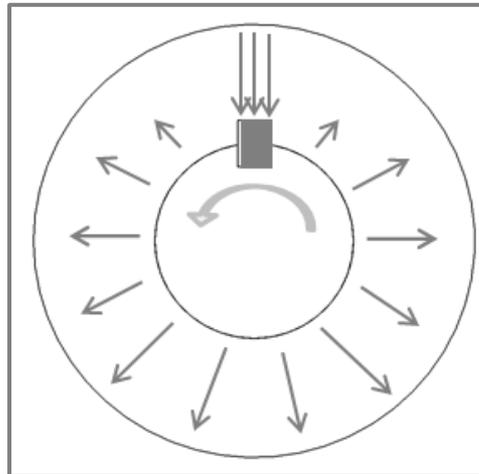


Fig. 159 Tensiones en poleas debido a su calado al eje con clavetas en forma de cuña

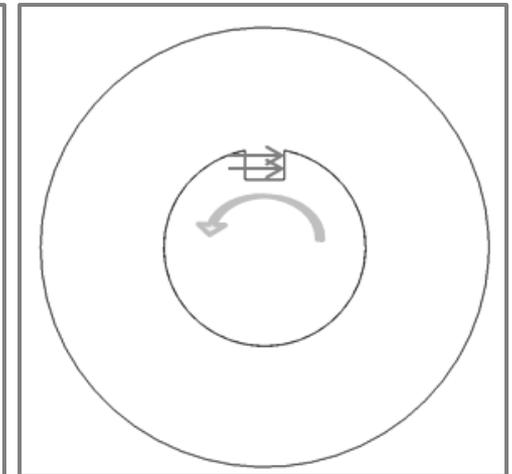


Fig. 160 Tensiones en poleas debidas a su calado al eje con clavetas en forma prismática

2. FALLOS PROPIOS DE CORREAS Y POLEAS

2.4. Fallos por errores en el montaje

Causas de los fallos		Efectos sobre el elemento		Consecuencia final
Correa dentada (timing) demasiado tensada	→	<ul style="list-style-type: none"> • Sobretensión en la correa • Calentamiento de la correa (y polea) 	→	<ul style="list-style-type: none"> • Desgastes anormales • Fatiga • Sobrecarga en los cojinetes de apoyo
Correa dentadas poco tensadas	→	<ul style="list-style-type: none"> • Saltos de la correa • "Golpes de carga" • Marcha irregular 	→	<ul style="list-style-type: none"> • Desgastes anormales • rotura de la correa o sus dientes

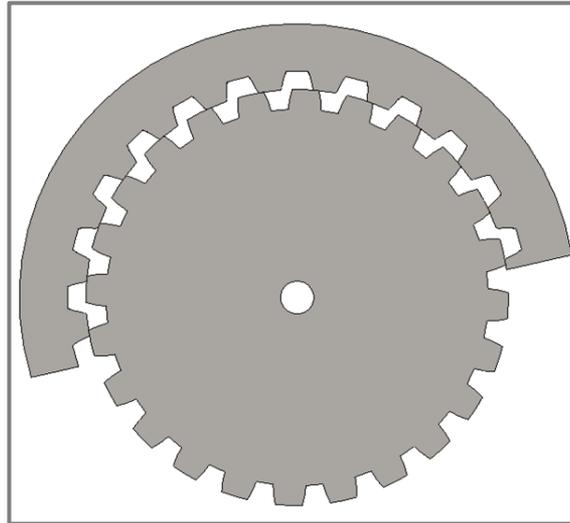


Fig. 161 Salto de la correa dentada

2. FALLOS PROPIOS DE CORREAS Y POLEAS

2.4. Fallos por errores en el montaje

Causas de los fallos		Efectos sobre el elemento		Consecuencia final
Correa en V demasiado tensada	→	<ul style="list-style-type: none"> • Sobretensión en la correa • Calentamiento de la correa (y polea) 	→	<ul style="list-style-type: none"> • Desgastes anormales • Fatiga • Sobrecarga en los cojinetes de apoyo
Correa V poco tensada	→	<ul style="list-style-type: none"> • Patinamiento (deslizamiento) de la misma sobre la polea. • Elevación de la temperatura de la correa (y polea) 	→	<ul style="list-style-type: none"> • Desgastes anormales en correa y polea (El desgaste de la polea le hace perder la rectitud de sus flancos, dejándola con forma ahuecada) • Fatiga • Ruido característico (chillido de la correa)

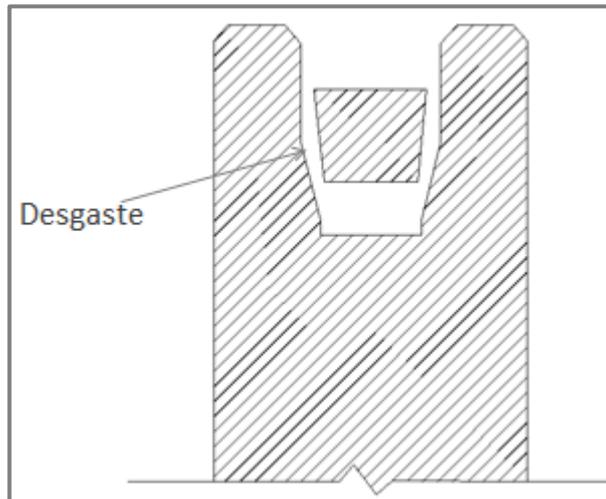


Fig. 162 Desgaste de la polea

NOTA

Por esta razón nunca debe colocarse una correa nueva en una polea vieja

(Un método rápido y sencillo para determinar la existencia de deslizamientos cuando este no se acompaña de ruido es poner una marca de tiza sobre la correa y la polea y ver si se han desplazado después de un cierto período de trabajo).

2. FALLOS PROPIOS DE CORREAS Y POLEAS

2.4. Fallos por errores en el montaje

Causas de los fallos		Efectos sobre el elemento		Consecuencia final
Desalineamientos de las poleas (en V y dentadas) y la correa (defectos de paralelismo)	→	<ul style="list-style-type: none"> • Presiones elevadas en la zona de las caras laterales (al ser la correa “empujada” contra las paredes de la polea). • Calentamiento 	→	<ul style="list-style-type: none"> • Desgastes de la correa por la zona de sus caras laterales. • Desgastes de las paredes de la polea. En caso de desalineamiento muy elevado la correa puede remontarse en la polea y salirse de ella, o incluso ser “seccionada” la correa (especialmente las dentadas por el borde cortante de la polea) (figura 163)
Correa mas ancha de la normal	→	<ul style="list-style-type: none"> • Presiones en las caras laterales de la correa y las poleas • Calentamiento 	→	<ul style="list-style-type: none"> • Desgastes de la correa por la zona de sus caras laterales. • Desgastes de las paredes de la polea.

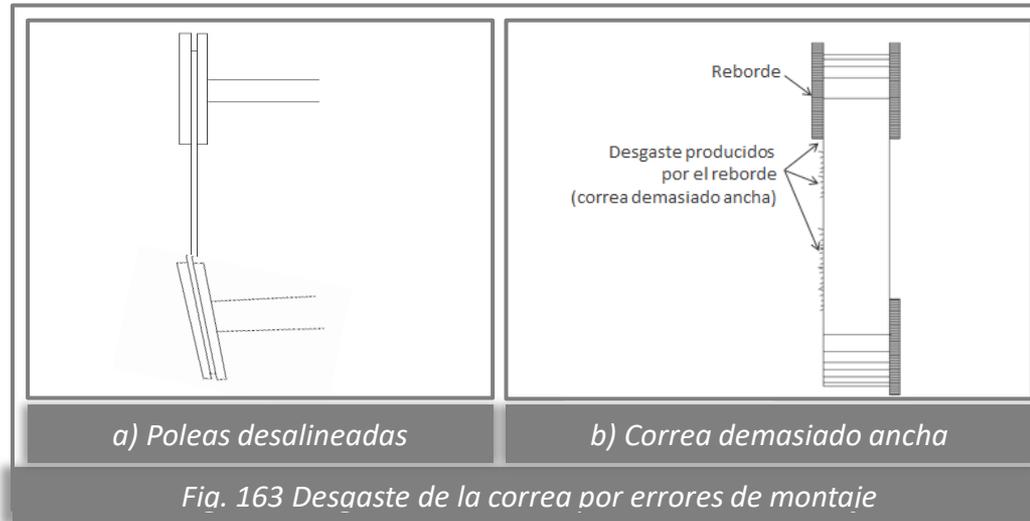


Fig. 163 Desgaste de la correa por errores de montaje

2. FALLOS PROPIOS DE CORREAS Y POLEAS

2.4. Fallos por errores en el montaje

Causas de los fallos		Efectos sobre el elemento		Consecuencia final
Forzamiento de la correa para colocarla en la polea, "apalancandola". (El apalancamiento ocurre cuando no se reduce en la medida conveniente la distancia entre centros de ambas poleas en el momento de montaje de la correa)	→	<ul style="list-style-type: none"> Cortes en el material textil y de goma, en su parte exterior (figura 164) Si el apalancamiento es muy fuerte pueden romperse algunos de los cordones de acero interiores lo que conduce a una tendencia a girar la correa sobre su eje longitudinal, atacando la polea en forma incorrecta (retorcida)	→	<ul style="list-style-type: none"> Incremento de la fatiga (disminuyendo su vida posterior)

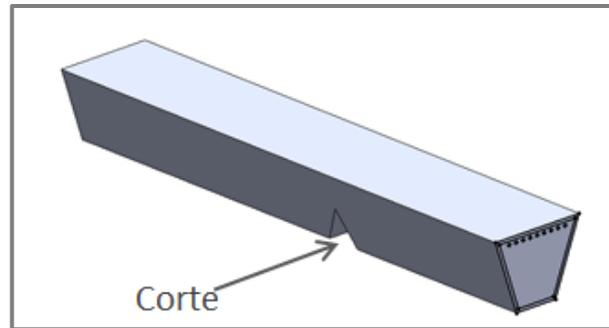


Fig. 164 Goma cortada por su parte exterior

Causas de los fallos		Efectos sobre el elemento		Consecuencia final
Sujeción incorrecta de las poleas al árbol donde van caladas	→	<ul style="list-style-type: none"> Contactos anormales entre correa y poleas por el ladeo de estas 	→	<ul style="list-style-type: none"> Desgastes anormales tanto de la correa como de las poleas

2. FALLOS PROPIOS DE CORREAS Y POLEAS

2.5. Fallos por incorrectas condiciones de servicio y mantenimiento

Causas de los fallos		Efectos sobre el elemento		Consecuencia final
Sobrecargas en servicios continuadas sin deslizamientos	→	<ul style="list-style-type: none"> Sobretensiones en la correa 	→	<ul style="list-style-type: none"> Incremento de la rotura por fatiga.
Sobrecargas en servicios continuadas con deslizamientos	→	<ul style="list-style-type: none"> Patinamiento de la correa Elevaciones de temperatura en correa y polea 	→	<ul style="list-style-type: none"> Desgastes elevados en correa y polea Fatiga Ruidos (chirrido de patinamiento)
Sobrecargas en servicios transitorias.	→	<ul style="list-style-type: none"> Sobretensiones en la correa Patinamiento de la correa 	→	<ul style="list-style-type: none"> Fatiga Desgastes en correa y poleas
Velocidad de trabajo más alta de la admisible	→	<ul style="list-style-type: none"> Sobretensiones por doblado Calentamiento 	→	<ul style="list-style-type: none"> Rotura por fatiga
Temperaturas elevadas de servicio	→	<ul style="list-style-type: none"> Endurecimiento de la correa Grietas en la correa 	→	<ul style="list-style-type: none"> Rotura por fatiga acelerada

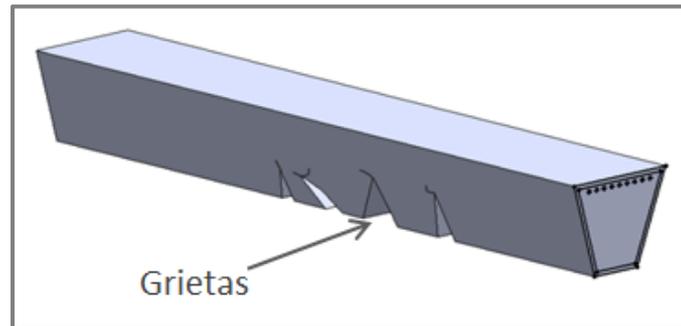


Fig. 165 Grietas por calentamiento

2. FALLOS PROPIOS DE CORREAS Y POLEAS

2.5. Fallos por incorrectas condiciones de servicio y mantenimiento

Causas de los fallos		Efectos sobre el elemento		Consecuencia final
Colocación de una correa nueva en una polea desgastada	→	<ul style="list-style-type: none"> Desajuste entre los flancos de la correa y de las poleas 	→	<ul style="list-style-type: none"> Desgaste rápido de la correa (con una duración de vida mucho más corta de lo normal).
Aflojamiento de los mecanismos tensores de la correa	→	<ul style="list-style-type: none"> Aflojamiento de la correa Patinamiento Elevación de la temperatura 	→	<ul style="list-style-type: none"> Desgaste Fatiga Ruidos (chirridos)
Entrada de aceites (con base de hidrocarburos) en la correa	→	<ul style="list-style-type: none"> Reacciones químicas con la goma de la misma causando un deterioro en forma de "hinchazones" (en la zona de contacto con el petróleo) y a su vez quedando la superficie con una apariencia "gomosa", pegajosa. (figura 166) <p>Esta situación progresa hacia el interior y destruye la correa (al perder los alambres de acero la rigidez de su soporte)</p>	→	<ul style="list-style-type: none"> Destrucción total y rápida de la correa

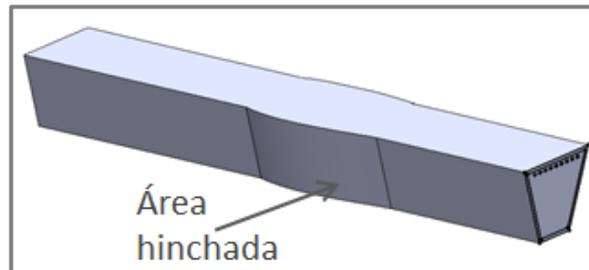


Fig. 166 Hinchazón en la goma

2. FALLOS PROPIOS DE CORREAS Y POLEAS

2.5. Fallos por incorrectas condiciones de servicio y mantenimiento

Causas de los fallos		Efectos sobre el elemento		Consecuencia final
<p>Entrada de partículas de polvo y suciedad entre la correa y las poleas (Las partículas duras pueden incluso actuar como agentes abrasivos tanto sobre la correa como principalmente sobre las poleas).</p>	→	<ul style="list-style-type: none"> • Pérdida de adherencia entre correa y poleas • Patinamiento • Calentamiento 	→	<ul style="list-style-type: none"> • Desgaste acelerado en correa y poleas. • Ruido (chirrido)

2. FALLOS PROPIOS DE CORREAS Y POLEAS

2.6. Fallos en condiciones normales de servicio

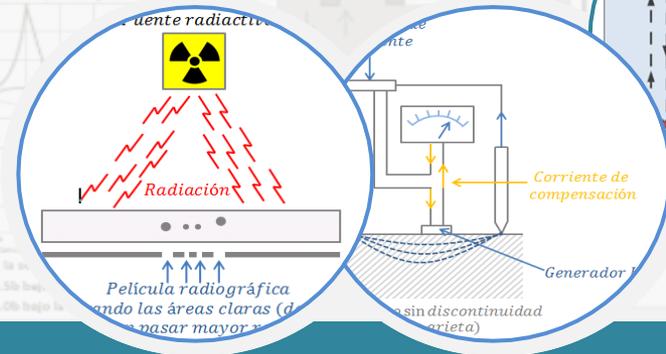
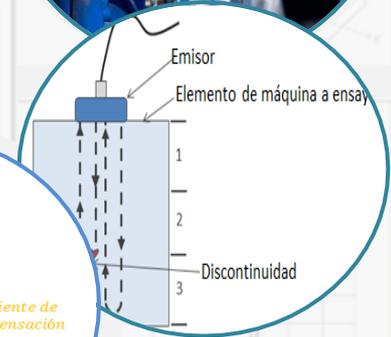
NOTA

Tanto el desgaste como la fatiga son inherentes al propio funcionamiento de las correas, por lo que son inevitables, incluso en condiciones de funcionamiento correctas limitando la vida útil de estas.

Causas de los fallos		Efectos sobre el elemento		Consecuencia final
Esfuerzos variables de tracción (paso de ramal cargado a descargado) y el doblado (paso sobre las poleas)	→	<ul style="list-style-type: none"> Elevadas tensiones variables en la correa 	→	<ul style="list-style-type: none"> Fatiga en la correa
Rozamiento (deslizamientos) entre las caras laterales de la correa y las poleas V	→	<ul style="list-style-type: none"> Rozamientos entre las caras laterales de la acanaladura de las poleas 	→	<ul style="list-style-type: none"> Desgaste en el material blando de los laterales de la correa Desgaste las paredes interiores de las poleas.

MÓDULO 7

Técnicas de detección de fallos en elementos de máquinas



TEMA 3

TÉCNICAS ACUSTICAS PARA LA DETECCIÓN DE FALLOS EN MÁQUINAS

PREÁMBULO

Este tema denominado TÉCNICAS ACÚSTICAS PARA LA DETECCIÓN DE FALLOS EN ELEMENTOS DE MÁQUINAS es el tercero de los seis temas de los que consta el Módulo 7 ANÁLISIS Y DETECCIÓN DE FALLOS EN ELEMENTOS DE MÁQUINAS y se enmarca dentro de su segundo bloque CUERPO CENTRAL DE CONOCIMIENTOS SOBRE EL MANTENIMIENTO DE MÁQUINAS en el contexto de lograr una progresividad en el aprendizaje.

Este tema consta de tres partes:

- En la primera se realiza una introducción
- En la segunda se presenta la técnica de sonido directo
- En la tercera parte se presentan las técnicas ultrasónicas

CONTENIDO DEL TEMA

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Introducción general

2. SONIDO DIRECTO

2.1. Introducción

3. TÉCNICAS ULTRASÓNICAS

3.1. Definición y aplicaciones

3.2. Generación del ondas ultrasónicas

3.3. Propiedades físicas empleadas en la utilización de ultrasonidos

3.4. Técnica de pulso - eco

3.4.1. Concepto

3.4.2. Equipos utilizados

3.4.3. Procedimiento del ensayo pulso eco

3.4.4. Ventajas e inconvenientes del sistema pulso eco

3.4.5. Otras aplicaciones del pulso eco

3.5. Técnica de atenuación

3.6. Ejemplos de equipos industriales

3. TÉCNICAS ULTRASÓNICAS

3.1. Definición y aplicaciones

Las técnicas de ultrasonidos se basan en el estudio del comportamiento de una onda ultrasónica que se genera en un emisor y que se desplaza por el interior de un cuerpo elástico (en realidad es una onda elástica que se desplaza a la velocidad de propagación constante y propia de ese medio e independiente de la frecuencia). La existencia de una heterogeneidad en el material (como puede ser una cavidad en una pieza incorrectamente moldeada, una grieta, etc.) origina una serie de perturbaciones en la onda ultrasónica (como puede ser una variación en velocidad de propagación, una reflexión de la onda o una atenuación de la misma). Cualquiera de estas “reacciones” al paso de la onda ultrasónica permiten conocer la existencia de la perturbación y con ella el estado del elemento de máquina.

Estas técnicas se aplican a la detección de fallos superficiales, sub superficiales e internos y algunas de ellas permiten definir el tamaño (forma) y posición de la discontinuidad, siendo los resultados del análisis inmediatos.

Las principales aplicaciones se encuentran en la determinación de defectos en la fundición y forja de los materiales (como laminaciones, poros, bolsas, retracciones, etc., defectos de mecanizado (superficiales), fallos por fatiga (grietas, etc.), etc.

(En realidad cualquier discontinuidad que produzcan interfaces reflectivas o absorbivas del haz ultrasónico).

3. TÉCNICAS ULTRASÓNICAS

3.2. Generación de las ondas ultrasónicas

Las ondas ultrasónicas utilizadas en estos ensayos tiene una frecuencia comprendida entre 20 kHz y 20 MHz. Esta onda sónica no se propaga por igual en todas las direcciones sino que siguen una dirección preferente de acuerdo con el tamaño del emisor formando un “haz sónico”

Existen dos métodos para generar la onda ultrasónica (emisor): la piezo-electricidad y la magneto estricción.

- El primero utiliza el efecto contrario al piezoelectrico y se basa en la propiedad de que una variación de la corriente que atraviesa un cristal piezoelectrico (cuarzo, cerámicas polarizadas o piezopolimeros) encerrado entre dos placas metálicas lo hace cambiar sus dimensiones – vibrar -, a la misma frecuencia en que varía la corriente (figura 21).

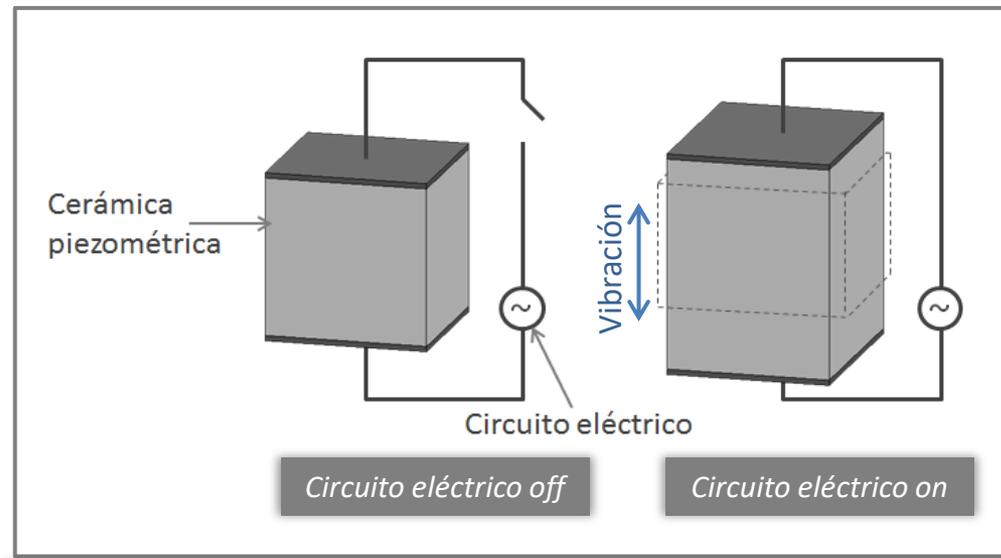


Fig. 21 Efecto piezoelectrico

3. TÉCNICAS ULTRASÓNICAS

3.2. Generación de las ondas ultrasónicas

- El segundo utiliza el efecto contrario a la magneto estricción que consiste en que un campo magnético variable hace cambiar las dimensiones – vibrar – a ciertos materiales ferromagnéticos a la misma frecuencia que oscila el campo magnético (figura 22).

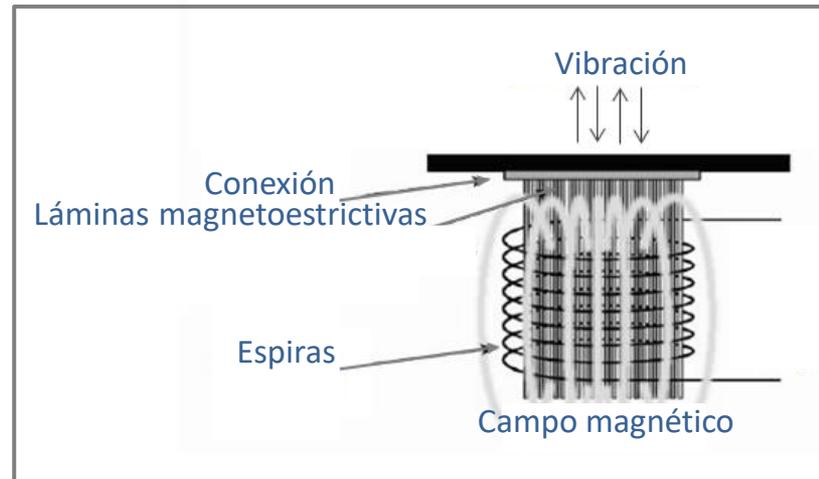


Fig. 22 Efecto magnetoestrictivo

En los Puntos 3.7 y 3.8 del Tema 3 del módulo X3 se exponen los conceptos de sensores piezo eléctricos y magneto restrictivos

3. TÉCNICAS ULTRASÓNICAS

3.3. Propiedades físicas empleadas en la utilización de ultrasonidos

En cuanto a las propiedades físicas empleadas para la detección de fallos por ultrasonidos pueden distinguirse tres:

- Reflexión del haz ultrasónico en las interfaces (de las discontinuidades internas o de los bordes del elemento de máquina).
- Atenuación del haz ultrasónico al ser absorbido por la discontinuidad o dispersado por la misma
- Variación del tiempo de tránsito del haz ultrasónico desde el momento de la emisión hasta el de recepción.

La utilización de una u otra de estas propiedades lleva al desarrollo de diversos equipos y técnicas para el análisis de fallos por ultrasonidos, denominadas:

- Técnica de pulso – eco (la mas usada).
- Técnica de atenuación.

Ambas serán analizadas en detalle en los puntos siguientes.

3. TÉCNICAS ULTRASÓNICAS

3.4. Técnica de pulso - eco

3.4.1. Concepto

Es un método basado en la propiedad de reflexión del haz ultrasónico y en la medida del tiempo que transcurre entre que la onda es emitida (pulso) hasta que vuelve al punto de partida (eco) el denominado “tiempo de vuelo”. Este tiempo de vuelo permite posicionar la perturbación “en profundidad” mientras que la variación de la intensidad del eco da una idea del tamaño de la perturbación (para lo que precisa en muchos casos generar una referencia de tamaño – calibrado de amplitud - con un elemento de máquina similar que contenga un fallo de magnitud conocida).

El modo de actuación de esta técnica pulso eco está representada en la figura 23.

La vibración del emisor de la onda ultrasónica se transmite al elemento de máquina a ensayar mediante un “acoplador” (o por contacto directo) y se propaga perpendicularmente a la superficie del emisor, mientras que la onda sónica reflejada es captada por un sensor (receptor) que la convierta en una señal eléctrica (que puede ser un sensor piezoeléctrico o magnetostrictivo, actuando ahora ambos como tales, es decir, generando una corriente eléctrica proporcional a la deformación que sufren).

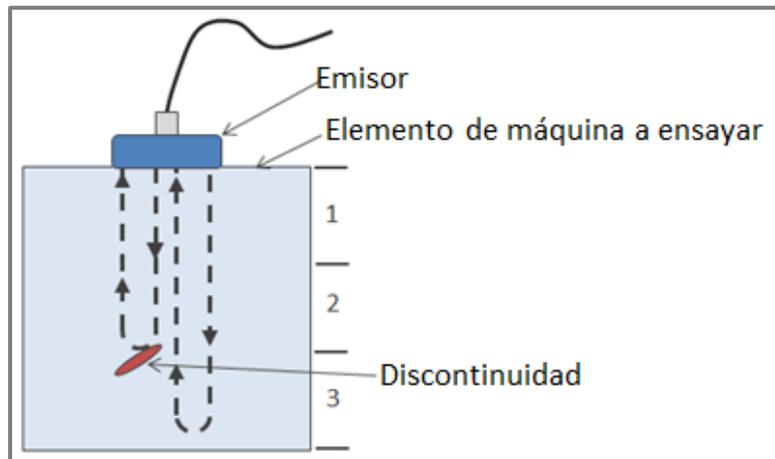


Fig. 23 Sistema pulso - eco

En el ejemplo de la figura 23 el elemento emisor y el receptor son el mismo sensor (emite el pulso y luego recibe el eco). Como se ve aparecen dos ecos: el eco de fondo, corresponde al espesor de la pieza, y el eco intermedio, originado por la perturbación.

La profundidad de la perturbación puede determinarse por el “tiempo de vuelo” directo o por la diferencia entre el eco de fondo y el producido por la perturbación.

3. TÉCNICAS ULTRASÓNICAS

3.4. Técnica de pulso - eco

3.4.1. Concepto

Un problema del sistema representado en la figura 24 es su incapacidad para detectar discontinuidades estrechas (como grietas) cuando están alineadas (paralelas) con el haz sónico.

Este problema se evita si el emisor y el receptor se separan emitiendo el primer haz ultrasónico en direcciones inclinadas respecto de la superficie del elemento de máquina a analizar, como se ve en la figura 24. Dependiendo de donde se posicionen ambos captadores puede eliminarse el eco de fondo y dependiendo de la inclinación pueden detectarse defectos en diferentes posiciones angulares (se denomina técnica de haz angular).

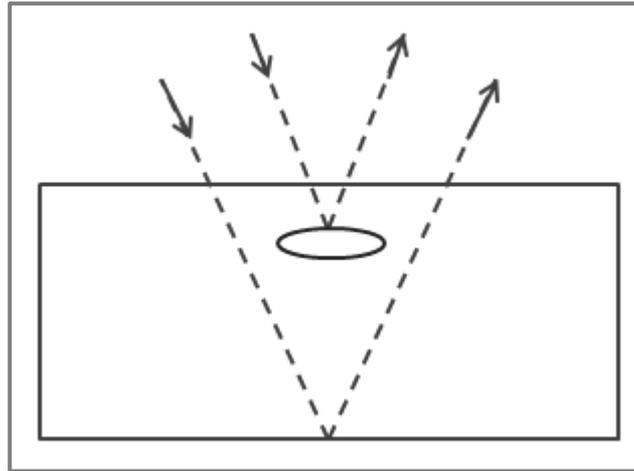


Fig. 24 Sistema pulso eco de haz angular

3. TÉCNICAS ULTRASÓNICAS

3.4. Técnica de pulso - eco

3.4.2. Equipos utilizados

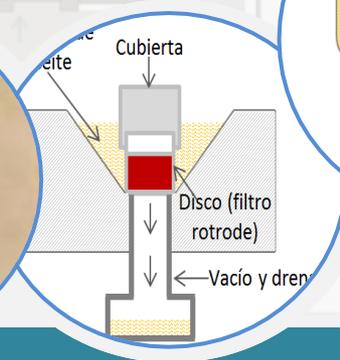
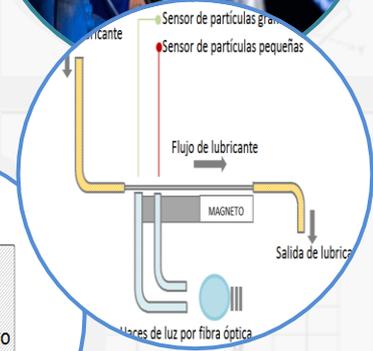
El análisis de fallos por este sistema pulso eco requiere el uso de una cadena de medida compuesta por múltiples sensores e instrumentos, entre los que cabe señalar:

- Un generador electrónico de pulsos de tensión que activen el material piezoeléctrico (o en su caso que generen pulsos del campo electromagnético que active el efecto magnetoestrictivo).
- El transductor piezoeléctrico o magnetoestrictivo que vibre con la frecuencia activada (emisor).
- Un acoplador para transferir la vibración del transductor al elemento de máquina a ensayar en las mejores condiciones posibles y que genere en su interior la onda ultrasónica .
- Un acoplador que transfiera la onda sónica reflejada al receptor.
- El transductor piezoeléctrico o magnetoestrictivo que reciba la vibración y la transforme en una corriente de salida (receptor) (Como se señaló anteriormente el emisor y el captador pueden ser el mismo sensor o no).
- Un dispositivo electrónico para amplificar y modificar las señales del transductor de salida (dada la extrema debilidad de la señal emitida por estos sensores).
- Un medidor de tiempo.
- Un dispositivo de salida que muestre la información resultante en una pantalla o permita su registro posterior.

(Aparte de lo anterior en muchos análisis con esta técnica se requieren patrones de contraste para determinar con precisión la posición y tamaño de los fallos).

MÓDULO 8

Detección de fallos en máquinas por análisis de los lubricantes



TEMA 3

IDENTIFICACIÓN DE FALLOS Y SUS CAUSAS POR EL ANÁLISIS DEL LUBRICANTE

PREÁMBULO

Este tema denominado IDENTIFICACIÓN DE FALLOS Y SUS CAUSAS POR ANÁLISIS DE LOS LUBRICANTES es el tercero de los tres temas de los que consta el Módulo 8 DETECCIÓN DE FALLOS EN MÁQUINAS POR ANÁLISIS DE LOS LUBRICANTES y se enmarca dentro de su segundo bloque CUERPO CENTRAL DE CONOCIMIENTOS SOBRE EL MANTENIMIENTO DE MÁQUINAS en el contexto de lograr una progresividad en el aprendizaje.

Este tema consta de cinco partes:

- En la primera se realiza una introducción sobre las causas genéricas de la contaminación de los lubricantes
- En la segunda se presentan los fallos asociados a la naturaleza de los contaminantes del lubricante
- En la tercera parte se presentan los fallos asociados a la forma de las partículas desgastadas
- En la cuarta parte se presentan algunos valores límites en la concentración de contaminantes en los lubricantes
- En la quinta parte se exponen algunos ejemplos de aplicación de estas técnicas

CONTENIDO DEL TEMA

1. INTRODUCCIÓN

- 1.1. Causas genéricas del deterioro de los lubricantes
- 1.2. Causas genéricas del envejecimiento de los lubricantes
- 1.3. Causas genéricas de la contaminación de los lubricantes
- 1.4. Efectos genéricos de la contaminación de los lubricantes

2. FALLOS ASOCIADOS A LA NATURALEZA DE LOS CONTAMINANTES DEL LUBRICANTE

- 2.1. Generalidades

3. FALLOS ASOCIADOS A LA FORMA DE LAS PARTÍCULAS DESGASTADAS

- 3.1. Introducción
- 3.2. Determinación de la naturaleza de las partículas de desgaste por el color en el ferrograma
- 3.3. Determinación del fallo a partir de la forma y textura de las partículas desgastadas
- 3.4. Formas típicas de las partículas desgastadas en diferentes componentes de máquinas

4. LÍMITES EN LA CONCENTRACIÓN DE CONTAMINANTES EN LOS LUBRICANTES

- 4.1. Generalidades

5. EJEMPLO DE APLICACIÓN

- 5.1. Pruebas complejas en laboratorio: Diagnóstico de fallos en motores de aviación

2. FALLOS ASOCIADOS A LA NATURALEZA DE LOS CONTAMINANTES DEL LUBRICANTE

2.1. Generalidades

Para simplificar y homogenizar la exposición se sistematizará en tres apartados:

Cambio detectado en el lubricante (con cualquiera de las técnicas)

Causas posibles del fallo

Fallos posibles en la máquina

Cambio detectado	Aumento de la viscosidad
Causas posibles de fallos	Envejecimiento del aceite, incremento de sustancias en suspensión (óxidos metálicos, restos de combustibles quemados, partículas sólidas metálicas, partículas sólidas no metálicas), existencia de agua disuelta o demulsionada que produce la oxidación del aceite, presencia de anticongelantes (glicol), excesivas temperaturas de trabajo (degradación térmica del aceite)
Fallos posibles en la máquina	Retrasos en los cambios de aceite, oxidaciones de partes metálicas, altas temperaturas de trabajo, desgastes, inclusión de polvo, fallos en los sistemas de refrigeración con agua (roturas de juntas y sellos, rotura de cavidades, etc.), fallos en los sistemas de condensación en los filtros de aire

2. FALLOS ASOCIADOS A LA NATURALEZA DE LOS CONTAMINANTES DEL LUBRICANTE

2.1. Generalidades

Cambio detectado	Disminución de la viscosidad
Causas posibles de fallos	Inclusión de combustibles no quemados, inclusión de solventes, inclusión de aire
Fallos posibles en la máquina	Fallos en los aros rascadores en los motores (que permite que se mezclen combustibles sin quemar con el lubricante), batido del aceite
Cambio detectado	Disminución del TBN
Causas posibles de fallos	Envejecimiento del aceite, contaminación por productos que incrementan la acidez, restos de combustibles sin quemar, inclusión de agua (disuelta o emulsionada)
Fallos posibles en la máquina	Retrasos en los cambios de aceite, desgastes de materiales que incrementan la acidez, fallos en los aros rascadores en los motores (que permite que se mezclen combustibles sin quemar con el lubricante), pérdidas en el sistema de refrigeración con agua (roturas de juntas y sellos, rotura de cavidades, etc.)

2. FALLOS ASOCIADOS A LA NATURALEZA DE LOS CONTAMINANTES DEL LUBRICANTE

2.1. Generalidades

Cambio detectado	Incremento de la oxidación del lubricante
Causas posibles de fallos	Envejecimiento del aceite, inclusión de agua, inclusión de aire, altas temperaturas de operación
Fallos posibles en la máquina	Retrasos en los cambios de aceite, pérdidas en el sistema de refrigeración con agua (roturas de juntas y sellos, rotura de cavidades, etc.), batido del aceite, sobrecargas que incrementen la temperatura de trabajo
Cambio detectado	Presencia de agua líquida
Causas posibles de fallos	Inclusión de agua, condensaciones de vapor
Fallos posibles en la máquina	Rotura en las cámaras de refrigeración, empaquetaduras y juntas de estanqueidad, excesiva concentración de vapor de agua que entra con el aire para la combustión en motores

3. FALLOS ASOCIADOS A LA FORMA DE LAS PARTÍCULAS DESGASTADAS

3.2. Determinación de la naturaleza de las partículas de desgaste por el color en el ferrograma

Entre las partículas metálicas pueden identificarse cinco categorías:

Fundición de hierro

Las partículas aparecen grises antes del tratamiento y amarillas después.

Acero de baja aleación

Las partículas se encuentran alineadas en cadenas (por tamaños) y aparecen de color gris-blanco cuando se las ilumina. Después del tratamiento aparecen de colores, azul, rojo o rosa.

Acero de alta aleación

Las partículas se encuentran alineadas en cadenas y su color es gris-blanco antes y después del tratamiento.

Óxidos metálicos negros

Las partículas se encuentran alineadas en cadenas y su color es oscuro o negro antes y después del tratamiento térmico.

Óxidos rojos (de herrumbre)

Pueden encontrarse alineados en cadenas, pero no siempre (si el grado de óxido es muy alto pueden encontrarse de forma aleatoria sobre la plaqueta de cristal). Su color es rojo antes y después del tratamiento.

Una gran cantidad de partículas de óxido, de pequeño tamaño (con apariencia de una playa de arena roja) es señal de desgaste corrosivo.

NOTA

Se recuerda que las partículas metálicas se identifican por un reflejo de la luz roja (y de la blanca). La luz verde transmitida es bloqueada por la partícula (opaca).

3. FALLOS ASOCIADOS A LA FORMA DE LAS PARTÍCULAS DESGASTADAS

3.2. Determinación de la naturaleza de las partículas de desgaste por el color en el ferrograma

Entre las partículas no metálicas pueden identificarse cinco categorías:

Partículas de color blanco

Se trata de aluminio o cromo. Se ven blancas y brillantes antes y después del tratamiento.

Partículas de color amarillo

Se trata de partículas de cobre. Se ven amarillas antes del tratamiento, o amarillas tirando a verde – gris después del tratamiento.

Partículas de color gris

Se trata de babitt, con formas delgadas (como trozos de latas). Después del tratamiento continúan grises pero moteadas de puntos azules y rojos y de menor tamaño (en forma de motas).

Contaminantes diversos

Aparecen al microscopio como unos cristales traslúcidos pues dejan pasar la luz verde del ferrograma. Su distribución es aleatoria y se trata normalmente de polvo de silicio.

Fibras

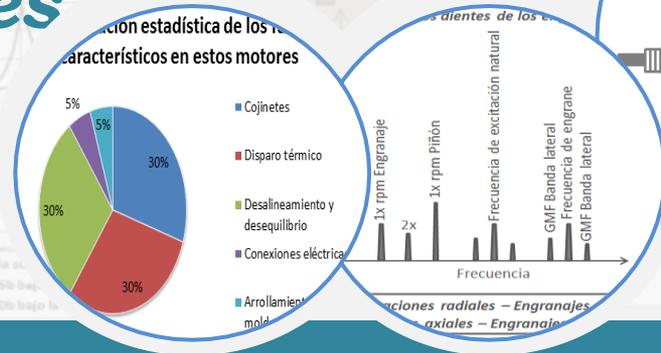
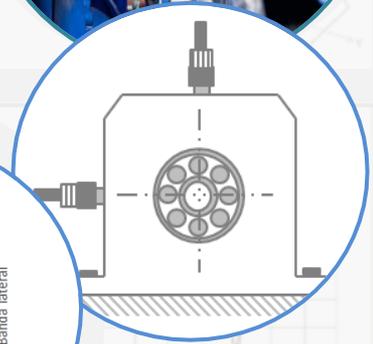
Se ven al microscopio como largas cadenas de varios colores que normalmente no cambian su color después del tratamiento térmico. Pueden aparecer en cualquier punto de la plaqueta, aunque siempre en zonas próximas a su salida (son fácilmente arrastradas). Se trata de fibras desprendidas de los propios filtros o del exterior que pasaron a través de ellos.

NOTA

Se recuerda que las partículas no metálicas se identifican por una posición aleatoria sobre la plaqueta del ferrograma, o acumuladas detrás de las cadenas de partículas férricas (en este caso las mayores detrás de las también mayores férricas).

MÓDULO 9

Técnicas de detección de fallos en máquinas por análisis de vibraciones



TEMA 2 DETECCIÓN DE FALLOS EN MECANISMOS SIMPLES

PREÁMBULO

Este tema denominado DETECCIÓN DE FALLOS EN MECANISMOS SIMPLES es el segundo de los tres temas de los que consta el Módulo 9 TÉCNICAS DE DETECCIÓN DE FALLOS EN MÁQUINAS POR ANÁLISIS DE SUS VIBRACIONES del Master de MANTENIMIENTO DE MÁQUINAS y se enmarca dentro de su segundo bloque CUERPO CENTRAL DE CONOCIMIENTOS SOBRE EL MANTENIMIENTO DE MÁQUINAS en el contexto de lograr una progresividad en el aprendizaje.

Este tema consta de seis partes:

- En la primera se realiza una introducción general al tema
- En la segunda se presentan los espectros de vibración en árboles y ejes debidos a diferentes causas (fallos)
- En la tercera parte se presentan los espectros de vibración en cojinetes de frotamiento
- En la cuarta parte se presentan los espectros de vibración en cojinetes de rodamientos
- En la quinta parte se presentan los espectros de vibración en engranajes debidos a diferentes causas
- En la tercera parte se presentan los espectros de vibración en correas y poleas

CONTENIDO DEL TEMA

1. INTRODUCCIÓN GENERAL

- 1.1. Introducción
- 1.2. Recordatorio y nota inicial

2. ESPECTROS DE VIBRACIÓN DE ÁRBOLES, EJES Y ROTORES

- 2.1. Introducción a los espectros de vibración de ejes, árboles u rotores
- 2.2. Espectros debidos a desequilibrios
- 2.3. Espectros debidos a resonancias
- 2.4. Espectros debidos a árbol doblado
- 2.5. Espectros debidos a grietas en el árbol
- 2.6. Espectros debidos a desalineamientos (paralelo y angular)
- 2.7. Espectros debidos a holguras (entre árbol y cojinete, entre el cojinete y el bastidor, en el propio bastidor)
- 2.8. Espectros debidos a fricciones del rotor

3. ESPECTROS DE VIBRACIÓN DE COJINETES DE FROTAMIENTO

- 3.1. Introducción
- 3.2. Espectros debidos a fallos en cojinetes de fricción (oil whirl)

4. ESPECTROS DE VIBRACIÓN DE COJINETES DE RODAMIENTOS

- 4.1. Introducción
- 4.2. Espectros de fallos en cojinetes de rodamientos
- 4.3. Análisis por envolvente
- 4.4. Análisis por impulso de choque (SPM)

CONTENIDO DEL TEMA

5. ESPECTROS DE VIBRACIÓN DE ENGRANAJES

- 5.1. Introducción
- 5.2. Espectro debido a dientes desgastados
- 5.3. Espectro debido a holguras y excentricidades
- 5.4. Espectro debido a ruedas desalineadas
- 5.5. Espectro debido a dientes rotos
- 5.6. Espectro debido a fallos simultáneos en rueda y piñón

6. ESPECTROS DE VIBRACIÓN DE CORREAS Y POLEAS

- 6.1. Introducción
- 6.2. Espectro debido a desgastados y holguras
- 6.3. Espectro debido a desalineamiento de las poleas
- 6.4. Espectro debido a excentricidades en las poleas
- 6.5. Espectro debido a resonancias en la correa

1. INTRODUCCIÓN GENERAL

1.1. Introducción

En el tema 1 de este Módulo 9 se vio que la vibración de una máquina en perfectas condiciones muestra una forma de onda compleja y periódica y un espectro de frecuencias formado por múltiples armónicos conformando la firma de vibración de la máquina.

Esta firma es el resultado de muchas excitaciones de vibración simultáneas, unas procedentes de acciones exteriores sobre la máquina y otras procedentes de órganos móviles aislados o conformando los diferentes mecanismos de la misma.

En este segundo supuesto puede afirmarse que cada elemento móvil, y cada mecanismo, tiene su propia firma de vibración y deja su huella sobre la vibración en su conjunto, conformándola.

El cambio en la “firma de vibración” de la máquina en su conjunto se deberá al cambio de la vibración de alguno (o algunos) de los elementos móviles y mecanismos que la componen, que quedará identificado por su correspondiente frecuencia (línea o líneas del espectro), mientras que la magnitud del cambio vendrá indicada por la modificación de la amplitud de la correspondiente línea.

Por tanto si se conocen las modificaciones de los espectros de vibración para elementos aislados o para mecanismos simples, en diferentes condiciones de fallo conocidas, pueden identificarse los fallos en la máquina cuando se observa en su espectro de vibración global tales modificaciones.

Precisamente el conocimiento del espectro de frecuencia correspondiente a diferentes fallos en los elementos de máquinas en movimiento, y en sus mecanismos, es lo que se aborda en este tema., con una salvedad: que solo se van a mostrar las firma de vibración de elementos y mecanismos mecánicos (la firma de los elementos no mecánicos serán abordadas en el tema 3).

1. INTRODUCCIÓN GENERAL

1.1. Introducción

Las causas más importantes de los cambios que pueden ser detectadas por el análisis de sus vibraciones son los siguientes:

- ✓ Desequilibrios (desbalanceo) en rotores
- ✓ Deformación de árboles y ejes
- ✓ Rotura de árboles y ejes
- ✓ Resonancias en ejes y árboles
- ✓ Desalineamientos de ejes y árboles acoplados
- ✓ Holguras en cojinetes, deslizaderas, uniones atornilladas, etc.
- ✓ Rozamientos de rotores con las carcasas, rozamientos entre gorrón y cojinete, etc.
- ✓ Defectos en los rodamientos
- ✓ Defectos en los cojinetes de frotamiento
- ✓ Batimiento del aceite en cojinetes de frotamiento (oil whirl)
- ✓ Defectos en las transmisiones por correas
- ✓ Defectos en los engranajes
- ✓ Fallos en sistemas hidráulicos y neumáticos.
- ✓ Cavitación

1. INTRODUCCIÓN GENERAL

1.1. Introducción

El análisis del estado de las máquinas, y de sus fallos, por el análisis de sus vibraciones, requiere un conocimiento profundo de la misma (de los elementos que la componen y de los mecanismos en que se unen), de su funcionamiento cinemático y dinámico, y especialmente de las causas y modos de fallo de los elementos u mecanismos.

En el Tema 3 del Módulo 0 se realiza una amplia exposición de los elementos y mecanismos más usuales que constituyen las máquinas.

En los Temas 1 a 13 del Módulo 6 se realiza un amplio estudio de las causas genéricas de los fallos en los elementos de máquinas.

Pero sobre todo la detección de fallos en máquinas por análisis de sus vibraciones requiere una amplia comprensión de las características de las acciones perturbadoras y de las vibraciones consecuentes, así como de las relaciones entre ambas, las cuales son propias de cada sistema vibrante, así como también de las características de funcionamiento de todos los transductores (sensores y otros elementos de la cadena de medida) empleados en la captación de las vibraciones y en los instrumentos empleados para su análisis posterior (analizadores FFT)

1. INTRODUCCIÓN GENERAL

1.1. Introducción

Recordatorio

Las vibraciones en una máquina se producen cuando esta es excitada en algunos de sus puntos (uno o varios) Estas excitaciones pueden tener diversas formas (armónicas, periódicas, impulsivas, aleatorias, etc.)

En el punto 3.3 del tema 3 del módulo 2 se vio como una excitación transitoria (que son las que se originan en las máquinas por golpes, rozamientos, etc.) está compuesta por infinitos armónicos, siendo normalmente las armónicos mas bajas los de mayor amplitud.

También se vio que excitaciones de corta duración contienen (se componen) altas frecuencias mientras que si son de larga duración contienen solo frecuencias bajas

También en el punto 3.4 de ese mismo Tema y Módulo se introdujo el concepto de bandas laterales

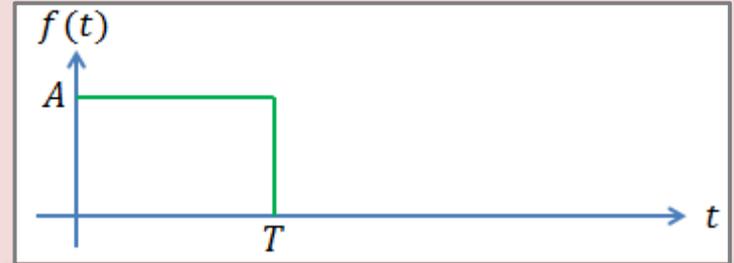


Fig. 12 Fuerza de excitación transitoria

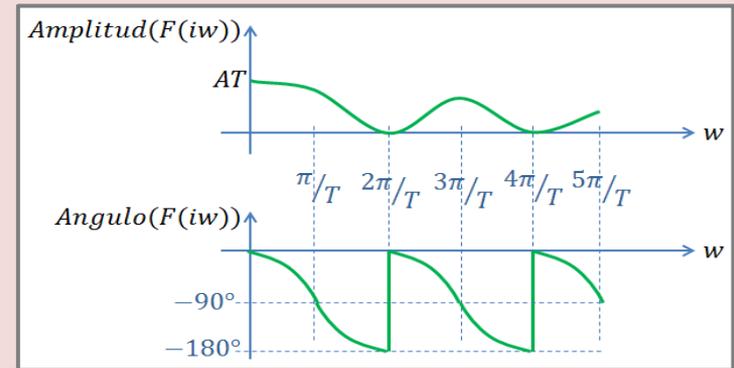


Fig. 13 Espectros de amplitudes y de fases de una fuerza de excitación periódica

En el tema 3 del Módulo 2 se realiza un amplio estudio de las características de las vibraciones (y de las acciones perturbadoras)

1. INTRODUCCIÓN GENERAL

1.1. Introducción

Recordatorio

A su vez la excitación origina una vibración que se transmite a través de todos los elementos elásticos de la máquina y puede ser medida en cualquier punto de esta.

En el punto 2.5 del tema 4 del Módulo 2 se vio que para el sistema resorte – masa – amortiguador de 1 GDL se vio que la relación entre la fuerza de excitación y la amplitud de la vibración resultante depende de la frecuencia de la primera (respuesta en frecuencia).

En la figura 14 se representa la respuesta en frecuencia de un sistema de este tipo excitado por una fuerza armónica. Para frecuencias de excitación bajas la amplitud de la vibración resultante es grande, se amplifica (especialmente para amortiguamiento débiles), mientras que para frecuencias de excitación altas la amplitud de la vibración es muy pequeña (se amortigua)

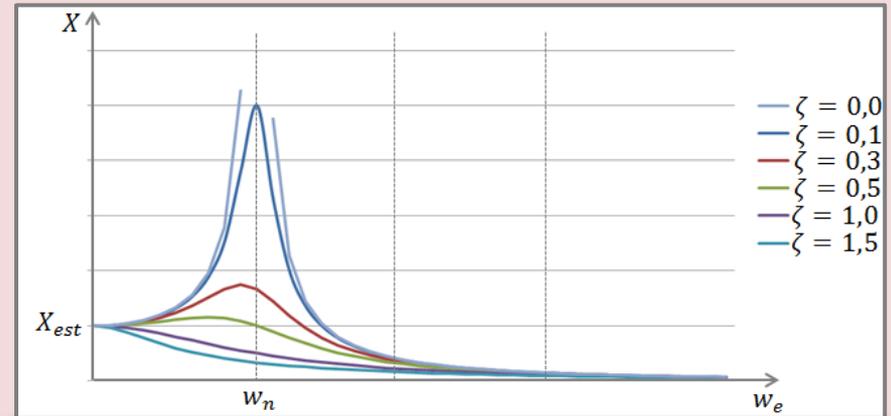


Fig. 14 Representación de respuesta en frecuencia de un sistema resorte – masa – amortiguador de 1 GDL excitado por una fuerza armónica

En el Tema 4 del Módulo 2 se realiza un amplio estudio de los sistemas vibrantes y se definieron las respuesta en frecuencia para varios de ellos

1. INTRODUCCIÓN GENERAL

1.1. Introducción

Recordatorio

De acuerdo a lo anteriormente expuesto una excitación transitoria de corta duración de una máquina (idealizada por el sistema masa – resorte -amortiguador de 1 GDL) equivale a aplicarle a la misma un conjunto de excitaciones armónicas de alta frecuencia con valores de la amplitud decrecientes. Además, cada una de estas amplitudes pueden estar amplificadas o amortiguadas, dependiendo de la respuesta en frecuencia del sistema. (En este caso, cuanto mas alta sea la frecuencia, mas amortiguada se encontrará la vibración)

Por otro lado las vibraciones en cualquier punto de una máquina son recogidas por los correspondientes sensores y su cadena de medida (que tienen sus propias características dinámicas) y posteriormente analizadas en los Analizadores FFT. que constituye el equipo mas utilizado para el análisis de las vibraciones y que también presenta sus propias características, entre estas destacan sus limitaciones en cuanto al número de frecuencias del espectro que pueden presentarse en su monitor (display) (que por regla general no pasan de 400, aunque pueden concentrarse en bandas de frecuencia –zooming-).

En el Tema 1 de este Módulo 9 se vio la cadena de medida para el análisis de vibraciones y en el punto 6 del Tema 5 del Módulo 3 se realizó un detenido análisis del Analizador de Señales Dinámicas FFT

2. ESPECTROS DE VIBRACIÓN DE ÁRBOLES, EJES Y ROTORES

2.2. Espectros debidos a desequilibrios

Como se sabe es imposible eliminar por completo el desequilibrio en árboles y ejes de máquinas lo que se traduce en unas fuerzas rotatorias que inducen fuerzas, también rotatorias, en los soportes de ejes y árboles que finalmente son las causantes de las vibraciones.

Y esto ocurre no solo en rotores rígidos, sino mucho más en rotores flexibles, mucho más difíciles de equilibrar. Y en ambos casos la situación empeora si el rotor incorpora elementos como pueden ser grandes ruedas o álabes cuya geometría pueda modificarse en función de las condiciones de trabajo de la máquina. (El rotor de una turbina de gas de gran potencia se equilibra cuando esta se encuentra a plena carga, con los álabes fuertemente deformados por la presión de los gases y las elevadas temperaturas).

Por otro lado gran número de fallos en elementos de máquinas se traducen en modificaciones de los elementos rotatorios (corrosiones, desgastes y roturas en las ruedas caladas, por ejemplo), que modifican su grado de desequilibrio.

Estas fuerzas desequilibradas rotatorias pueden excitar cualquiera de los modos de vibración de los ejes y árboles con el consiguiente peligro de amplificación de las vibraciones (en cualquiera de sus modos)

Para obtener el espectro de vibración de un rotor desequilibrado se procede de acuerdo a la visto en el punto xx del tema 1 de este Módulo

Para ello se colocan los sensores en sus dos cojinetes, en dirección radial y para una mejor medida en los planos horizontal y vertical (como se ve en la figura 21). También debe colocarse un sensor en posición axial.

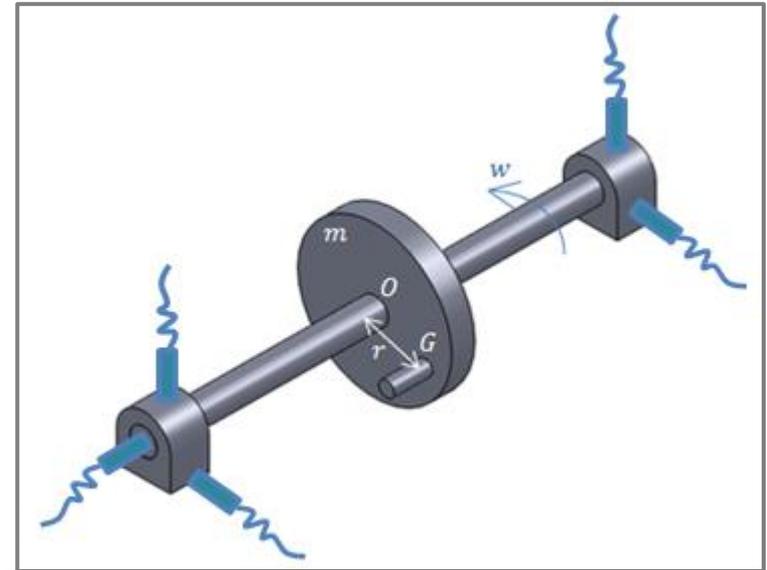


Fig. 21 Disposición de sensores para la obtención del espectro de vibración de un rotor desequilibrado

2. ESPECTROS DE VIBRACIÓN DE ÁRBOLES, EJES Y ROTORES

2.2. Espectros debidos a desequilibrios

Recordatorio

En los rotores pueden identificarse dos tipos de desequilibrios: el desequilibrio estático (detectado con una prueba estática) y el desequilibrio dinámico (detectado con una prueba dinámica).

Si AGB es el eje principal de inercia (pasa por el centro de gravedad), se tienen las tres posibilidades que se muestran en las figuras:

Si es paralelo al eje del rotor se tratará de un desequilibrio estático; si está inclinado respecto del eje de gira pero el c.d.g. esta situado en el se trata de un desequilibrio dinámico; si no se cumplen ninguna de las dos condiciones anteriores se trata de un desequilibrio general.

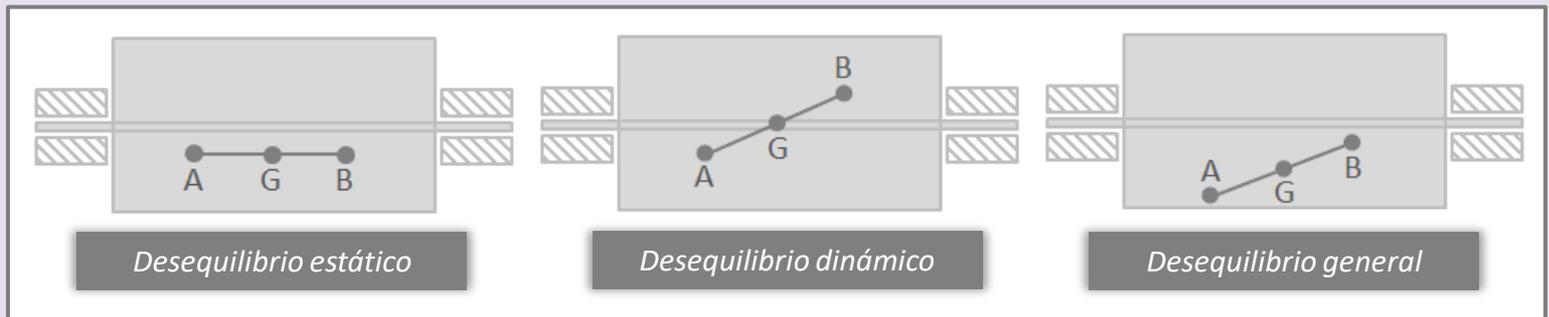


Fig. 22 Tipos de desequilibrio en rotores

2. ESPECTROS DE VIBRACIÓN DE ÁRBOLES, EJES Y ROTORES

2.2. Espectros debidos a desequilibrios

Recordatorio

La figura 23 representa un rotor con desequilibrio estático. Se observa que las fuerzas rotatorias sobre ambos cojinetes son iguales (en este caso, al estar el desequilibrio centrado) y están en fase (en todos los casos).

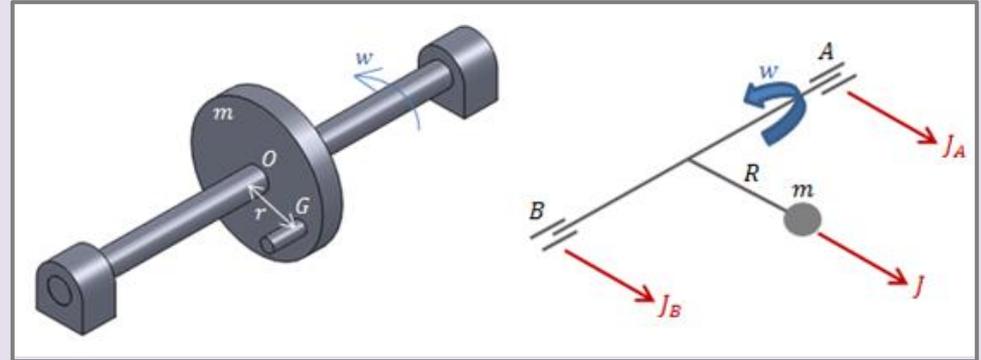


Fig. 23 Rotor con un desequilibrio estático

La figura 24 representa un rotor con desequilibrio dinámico. Se observa que las fuerzas rotatorias sobre ambos cojinetes son iguales (en este caso, al estar el desequilibrio centrado) y el desfase entre ambas es de 180° (en todos los casos).

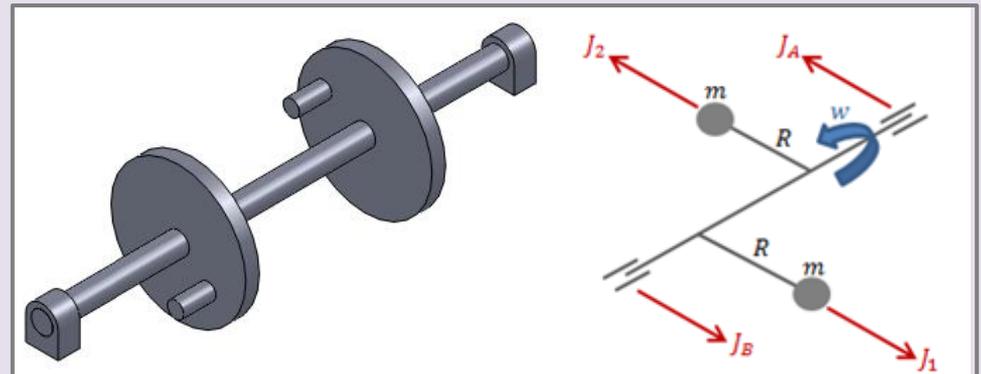


Fig. 24 Rotor con un desequilibrio dinámico

2. ESPECTROS DE VIBRACIÓN DE ÁRBOLES, EJES Y ROTORES

2.2. Espectros debidos a desequilibrios

Recordatorio

La figura 25 representa un rotor con un desequilibrio general representado por las dos masas desequilibrantes m_1 y m_2 .

Como consecuencia de este desequilibrio al girar el rotor aparecen dos fuerzas giratorias sobre los dos apoyos A y B, de diferentes magnitudes y diferentes fases.

El desequilibrio originado por la masa m_1 influye en la vibración en el cojinete A y en el B y el originado por la masa m_2 influye en el B y en el A. Se dice que existen “efectos cruzados”, o “acoplamiento”

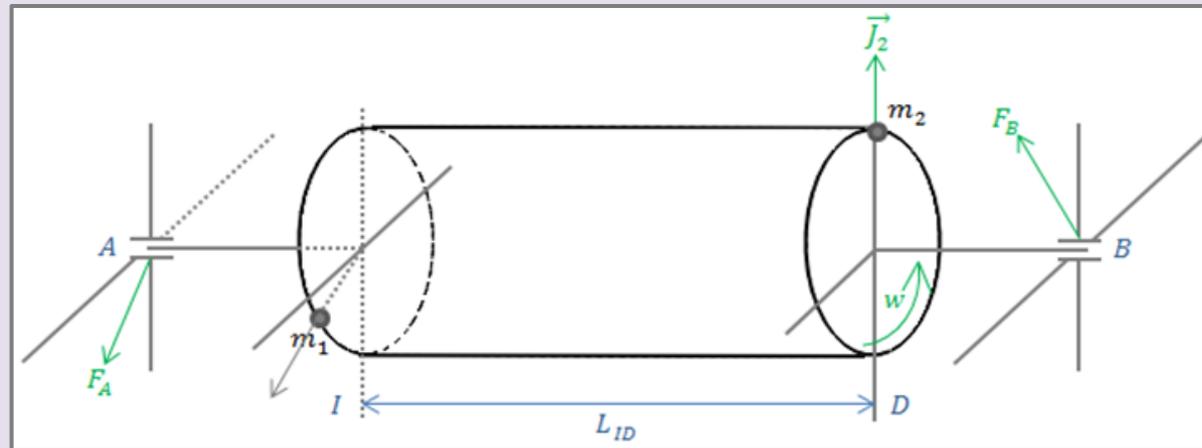


Fig. 25 Rotor con un desequilibrio general

En el Tema 2 del Módulo 4 se realiza un amplio estudio del desequilibrio y del equilibrado de rotores

2. ESPECTROS DE VIBRACIÓN DE ÁRBOLES, EJES Y ROTORES

2.2. Espectros debidos a desequilibrios

Desequilibrio estático

En el caso de desequilibrio estático todos los sensores reflejarán la misma amplitud de la vibración y tanto los dos horizontales como los dos verticales estarán en fase (con una diferencia de menos de $\pm 15^\circ$).

Al mismo tiempo los sensores horizontales y los verticales también reflejarán las mismas amplitudes, pero con un desfase de 90° (con una diferencia de menos de $\pm 30^\circ$).

(Naturalmente todas estas operaciones pueden hacerse con un solo sensor, cambiándolo de posición)

La forma de onda captada por todos y cada uno de los sensores es una senoide y el espectro de frecuencias contiene una sola línea, correspondiente a la frecuencia de giro (1x), con una amplitud proporcional al desequilibrio existente. Esta frecuencia del espectro está presente en todas las máquinas rotatorias y normalmente es la mas dominante.

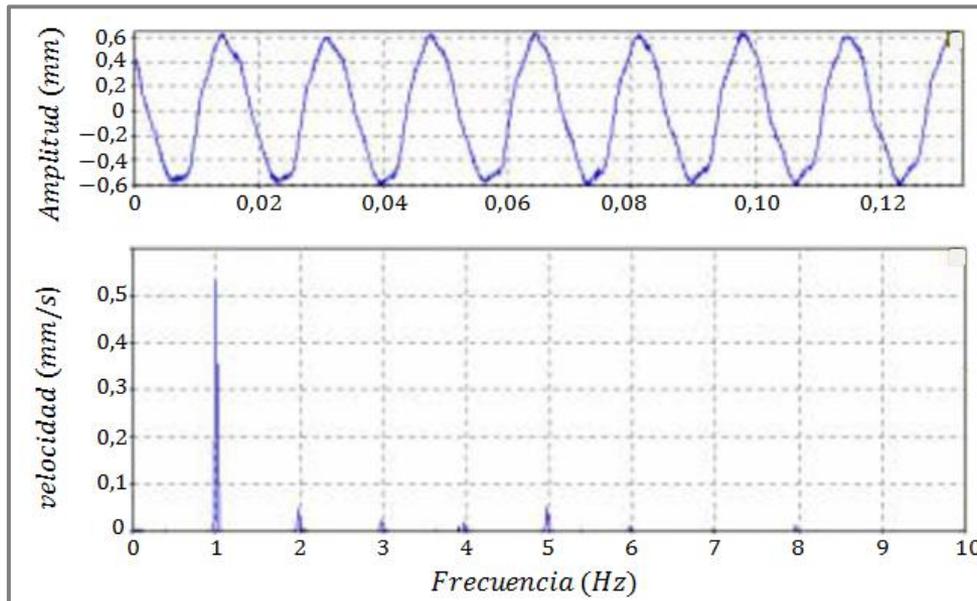


Fig. 26 Forma de onda y espectro de frecuencia de un desequilibrio estático

En la figura 26 se presenta la forma de onda y el espectro de frecuencia (obtenido en un FFT) de un desequilibrio estático.

Se aprecian unas irregularidades en la forma de onda, reflejadas en unas frecuencias de mayor rango pero de pequeña amplitud, lo que indica perturbaciones de menor entidad originadas por otras causas, o en otros puntos de la máquina donde está situado este árbol, o procedentes de la base de la máquina.

2. ESPECTROS DE VIBRACIÓN DE ÁRBOLES, EJES Y ROTORES

2.2. Espectros debidos a desequilibrios

Desequilibrio dinámico

En el caso de desequilibrio dinámico todos los sensores reflejaran la misma amplitud, pero los dos horizontales reflejarán un desfase próximo a los 180° y lo mismo los dos verticales

Obviamente, el espectro de la vibración es exactamente el mismo, medido en cualquier lado y posición.

Desequilibrio general

En el caso de desequilibrio general los sensores de cada lado (horizontales y verticales) reflejaran la misma amplitud, pero diferentes a las del otro lado.

Los ángulos de fase de cada lado también serán diferentes.

Obviamente, el espectro de la vibración será distinto para cada lado (su amplitud y desfase).

2. ESPECTROS DE VIBRACIÓN DE ÁRBOLES, EJES Y ROTORES

2.2. Espectros debidos a desequilibrios

Un caso especial es el de los árboles que soportan grandes volantes en voladizo, que también podrán estar en desequilibrio estático o dinámico. Pero en estos casos el desequilibrio del volante se traduce no solo en la aparición de vibraciones en los apoyos en sentido radial sino también axial (originada por el desplazamiento axial de la masa desequilibrada, como se ve en la figura)

En este caso habrá que colocar un sensor que mida la vibración en el sentido del eje del rotor (vibración axial) y los otros perpendiculares al eje, en los planos horizontal y/o vertical que midan las vibraciones radiales. Los sensores radiales en el plano vertical medirán la misma amplitud y estarán en fase, pero presentarán una cierta inestabilidad.

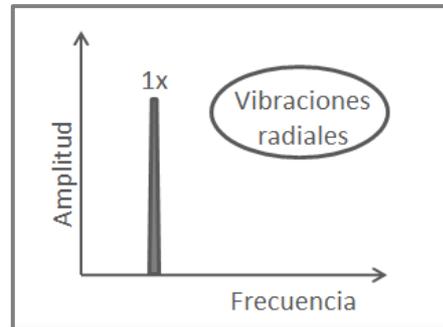


Fig. 27 Espectro debido al desequilibrio

NOTA

En el caso de ejes y árboles también se emplean otros procedimientos de análisis, como es el orbital y los diagramas de Nyquist y de Bode vistos en el Punto 2 del Tema 5 del Módulo 2

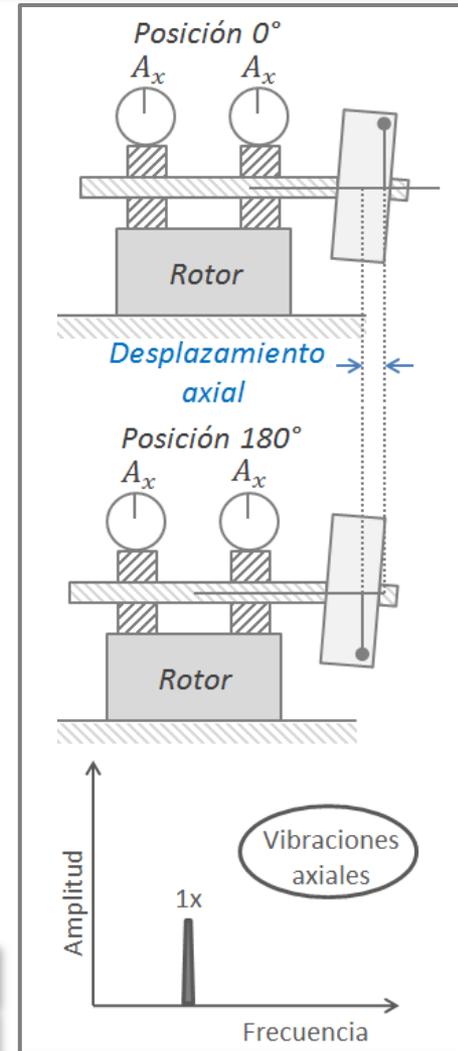


Fig. 28 Espectro de la vibración axial

2. ESPECTROS DE VIBRACIÓN DE ÁRBOLES, EJES Y ROTORES

2.6. Espectros debidos a desalineamientos en árboles acoplados (misalignment)

El desalineamiento, junto con el desequilibrio, es otra de las causas mas importantes de las vibraciones en máquinas.

El desalineamiento se produce cuando se conectan dos árboles mediante acoplamientos, sean estos rígidos o flexibles.

Pueden darse dos tipos de desalineamiento

- Desalineamiento angular en el cual los ejes de los dos árboles no son paralelos, formando un cierto ángulo entre ellos.
- Desalineamiento paralelo, en el cual los ejes de los dos árboles se mantienen paralelos pero no alineados.

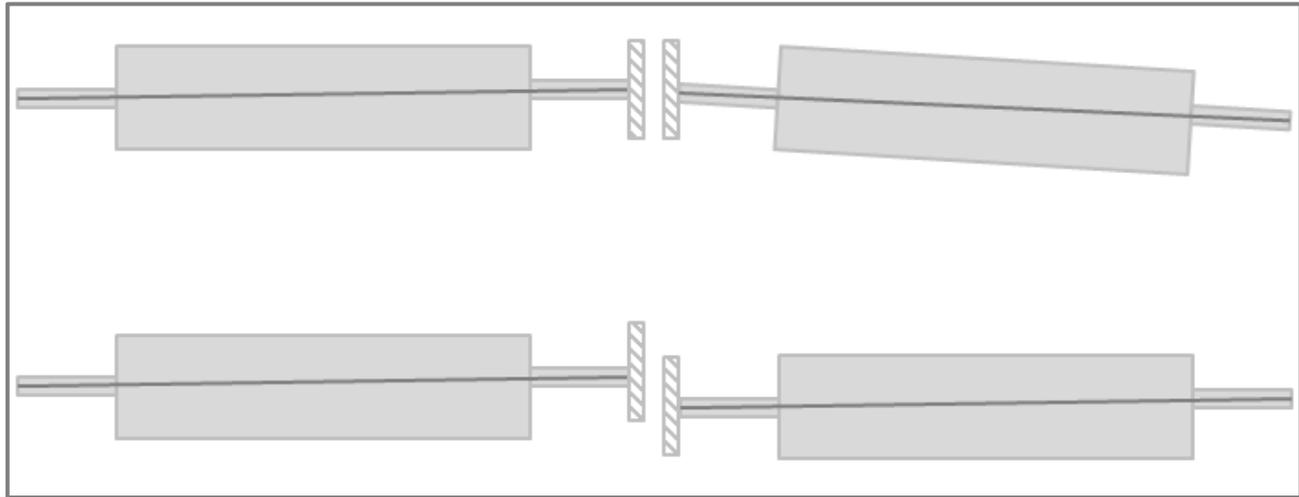


Fig. 33 Tipos de desalineamiento en árboles acoplados

2. ESPECTROS DE VIBRACIÓN DE ÁRBOLES, EJES Y ROTORES

2.6. Espectros debidos a desalineamientos en árboles acoplados (misalignment)

El desalineamiento angular da lugar a una vibración axial

En la figura 34 se muestra el árbol conductor (a la izquierda) y el árbol conducido (a la derecha).

Se supone que el árbol conductor esta fijo y es el árbol conducido es el que se desplaza a derecha e izquierda arrastrado por un supuesto perno de unión entre ambos.

En la figura se presenta una secuencia de posiciones angulares y se observa como el perno va arrastrando al árbol conducido hacia la izquierda, dotándole de un movimiento armónico en dirección axial, a la frecuencia de giro 1x.

En la práctica es casi imposible encontrar un desalineamiento angular puro, sino coincidente con otro paralelo que como se verá a continuación induce vibraciones 2x de menor valor que la anterior, e incluso holguras, que pueden inducir vibraciones 3x o mas altas.

Las vibraciones medidas en un sensor colocado en un cojinete del árbol conductor estará desfasada 180° de la medida en el árbol conducido.

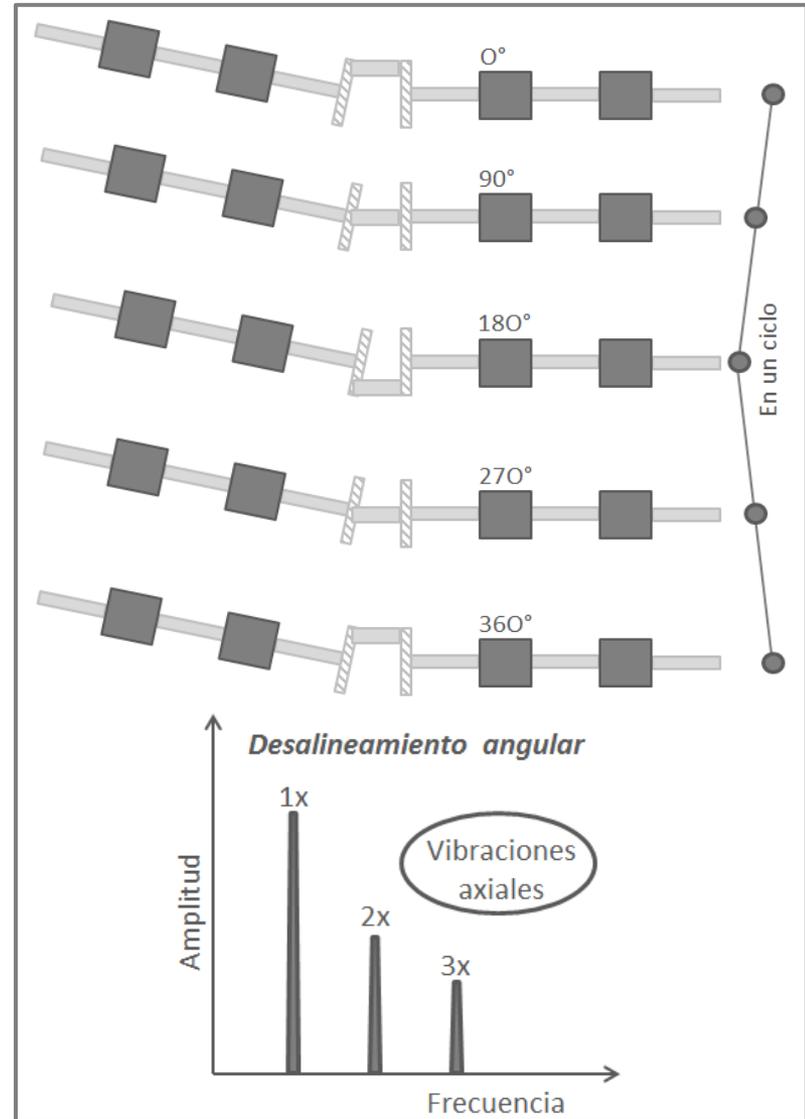


Fig. 34 Desalineamientos angulares en árboles acoplados

2. ESPECTROS DE VIBRACIÓN DE ÁRBOLES, EJES Y ROTORES

2.6. Espectros debidos a desalineamientos en árboles acoplados (misalignment)

La desalineación paralela da lugar a una vibración radial.

En la figura se presenta una secuencia de posiciones angulares de los dos árboles con sus ejes situados en el mismo plano (el vertical).

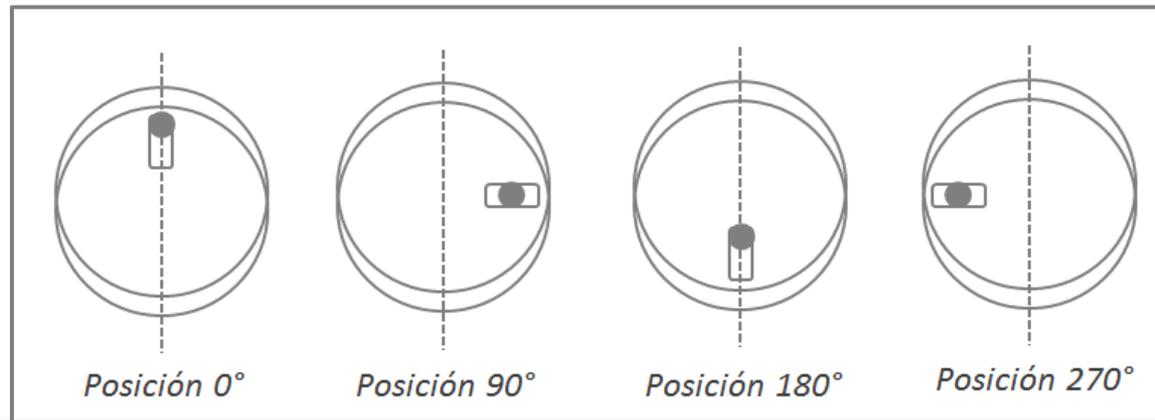


Fig. 35 Desalineamientos paralelos en árboles acoplados

Se ha dispuesto en el árbol conductor (situado mas hacia dentro del plano del dibujo) un tornillo fijo al mismo y en el árbol conducido (en primer plano) una ranura en la que encaja el tornillo, de forma que el giro del tornillo arrastra al árbol conducido, penetrando mas o menos este en la ranura en función de la posición relativa entre ambos)

Se observa como en la posición de 0° el perno está “pegado” al extremo exterior de la ranura, mientras que en la posición de 180° está pegado en el extremo interior de la misma. Estas posiciones extremas suponen dos “impactos” en cada vuelta de los árboles que son las que excitan las vibraciones de ambos (además de sus correspondientes desequilibrios a la frecuencia $1x$).

5. ESPECTROS DE VIBRACIÓN DE ENGRANAJES

Los engranajes son elementos de máquinas encargados de transmitir la rotación entre dos árboles por medio del empuje generado entre “dientes” trazados sobre perfiles conjugados de deslizamiento (normalmente evolventes de círculos). El conjunto de estos dientes configuran una “rueda dentada” y el conjunto de dos ruedas dentadas engranadas entre sí conforman un engranaje.

Con este sistema se logra transmitir elevados pares y potencias, dado que el valor de estos parámetros sólo queda limitado por la resistencia mecánica de los dientes.

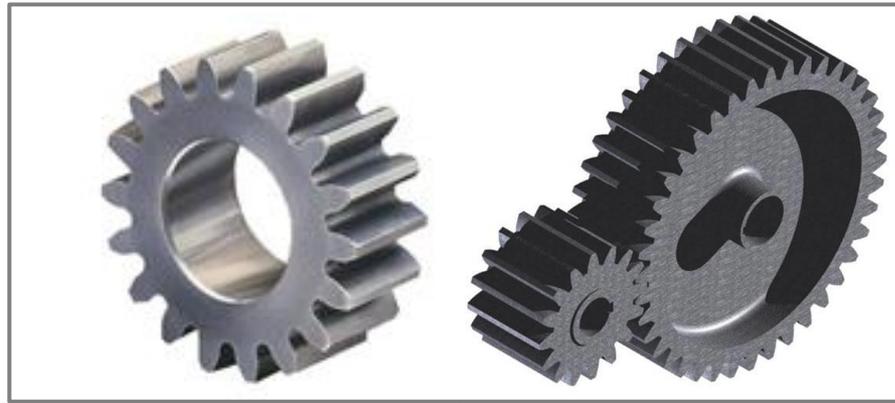


Fig. 60 Ejemplos de engranajes

En el Tema 5 del Módulo 6 se realiza una amplia exposición del funcionamiento de los engranajes y de sus fallos

5. ESPECTROS DE VIBRACIÓN DE ENGRANAJES

En los engranajes pueden determinarse varias causas directamente relacionadas con el origen de las vibraciones:

“Frecuencia de giro” de cada rueda

“Frecuencia de engrane”

“Frecuencia de contacto”

“Frecuencia de excitación”

“Holgura”

“Frecuencia de giro” de cada rueda

La frecuencia de giro es la correspondiente a la velocidad de giro de cada rueda

“Frecuencia de engrane”

La Frecuencia de Engrane (Gear Mesh Frequency) (GMF) es la frecuencia con la que un diente de una rueda contacta con cualquiera de los de la otra. Es igual al producto del nº de dientes de la misma por la velocidad de giro del eje o árbol al que esta calada.

(Por ejemplo, un piñón de 10 dientes que gira a 1 000 rpm tiene un valor de GMF de 10 000 *cpm*)

En una caja de engranajes habrán tantas frecuencias de engrane como engranajes contenga (recuérdese que un engranaje lo conforman dos ruedas dentadas engranadas).

NOTA

Obsérvese que la frecuencia de engrane es única para cada engranaje, es decir, para cada par de ruedas engranajes. Si en el ejemplo anterior la rueda de 10 dientes está engranada con otra de 20 dientes, la velocidad de esta segunda será de $1000 \cdot 10 / 20 = 500$ *cpm*, con lo cual la frecuencia de engrane calculada sobre esta será de $500 \times 20 = 10.000$ *cpm*)

5. ESPECTROS DE VIBRACIÓN DE ENGRANAJES

“Frecuencia de contacto”

La Frecuencia de Contacto (Hunting Tooth Frequency) (HTF) es la frecuencia en la que un diente concreto de una rueda contacta con un diente concreto de la otra.

Es igual a la frecuencia de engrane multiplicada por el mínimo común múltiplo del número de dientes de ambas ruedas del engranaje y dividida por el producto de los dientes de ambas ruedas.

(Por ejemplo, un piñón de 10 dientes que gira a 1 000 rpm y conduce una rueda de 23 dientes tiene un valor de HTF de 43,5 *cpm*)

Normalmente son frecuencias muy bajas, menores de 600 *cpm*, que pueden pasar desapercibidas en un análisis espectral de la vibración del engranaje

“Frecuencia de excitación”

La “Frecuencia de Excitación” se debe a defectos constructivos difícilmente evitables, especialmente en el periodo de vida inicial del engranaje, o a defectos de montaje, y que dan lugar a vibraciones anormales en cualquiera de las ruedas del engranaje.

“Holgura”

La “Holgura” (o juego) es imprescindible en todo engranaje para su buen funcionamiento de manera que si es insuficiente produce sobrecargas y desgastes y si es excesiva aumenta la presión de contacto y por tanto sobrecarga los dientes.

Las holguras, desgastes, vibraciones del árbol, etc., dan lugar a que las líneas en el espectro nunca sean puras, sino que van acompañadas de otras laterales de menor amplitud. Precisamente esas líneas laterales es la que contiene información sobre los fallos en los engranajes.

5. ESPECTROS DE VIBRACIÓN DE ENGRANAJES

En el caso de cajas de engranajes, formadas como se sabe por diversos pares de ruedas engranadas (diversos engranajes), todos los valores anteriores pueden definirse para cada par, con lo cual el espectro de vibración de una caja de engranajes puede ser muy complejo. En todo caso, en una caja de engranajes siempre puede conocerse la velocidad de giro de todas y cada una de sus ruedas por simples relaciones cinemáticas.

En los engranajes (y en las cajas de engranajes) los contactos entre los dientes con cargas mas o menos elevadas suponen la aplicación de fuerzas de corta duración sobre los mismos (y por tanto conteniendo múltiples armónicos) que producen vibraciones también con todos esos armónicos que se transmiten al resto de la máquina (eje, apoyos, etc.) Por otro lado, las vibraciones de estos (inducidas por esta causa o por otras, como pueden ser desequilibrios, excentricidades, etc.) se acoplan unas con otras, produciendo modulaciones de amplitud mas o menos visibles en la forma de onda y en el espectro de frecuencia, con la consecuente aparición de bandas laterales.

Los fallos mas frecuentes en los engranajes (al margen de los derivados de una mala construcción) y que tienen importancia de cara a un mantenimiento predictivo son los desgastes, las holguras y excentricidades, el desalineamiento entre ambas ruedas y la rotura de los dientes.

5. ESPECTROS DE VIBRACIÓN DE ENGRANAJES

Recordatorio sobre bandas laterales

En el punto 3.5 del Tema 3 del Módulo 2 se expuso el concepto de modulación de amplitud y bandas laterales y se recuerda aquí aplicado a un engranaje.

Se supone un eje que soporta una rueda dentada de 20 dientes que gira a 200 rad/s (200 Hz)

En el giro de la rueda cada uno de sus dientes impacta con el de la otra con una frecuencia de $20 \times 200 = 4.000$ Hz (recuérdese que si el grado de recubrimiento es 1 cuando dos dientes dejan de tocarse ya hay otros dos que comienzan a hacerlo)

Si la rueda tuviera un ligero desequilibrio en el espectro de frecuencias deberían aparecer dos líneas, una correspondiente a 200 Hz (debida al desequilibrio) y otra a 4.000 Hz, debida al impacto entre los dientes, pero la realidad es que en el espectro de la vibración aparecen dos (o más) picos a ambos lados de la frecuencia de 4.000 Hz, denominados “bandas laterales”.

Antes de continuar ha de tenerse presente que estos impactos son una fuerza impulsiva que provoca una vibración periódica compuesta por infinitos armónicos, siendo el primero el de mayor amplitud.

Suponiendo que es este primer armónico el más relevante lo que ocurre en realidad es que el movimiento excéntrico de la rueda hace que los contactos entre los dientes no tengan la misma intensidad en todas las posiciones de la misma.

Esto se traduce en que la vibración debida a la frecuencia de engrane se ve influida, “modulada” por la vibración debida a la excentricidad. En otras palabras, la frecuencia de 200 Hz modula la frecuencia de 4.000 Hz. El resultado es la aparición de dos “bandas laterales” alrededor de la frecuencia de 4.000 Hz, una de $4.000 - 200 = 3.800$ Hz y otra de $4.000 + 200 = 4.200$ Hz.

Si las amplitudes del 2º y 3º armónicos fueran significativas aparecerían dos o tres bandas laterales a cada lado, aún cuando de menor amplitud.

5. ESPECTROS DE VIBRACIÓN DE ENGRANAJES

Recordatorio sobre cepstrum

En el punto 3.7.2 del Tema 5 del Módulo 2 se expuso el concepto de cepstrum definido como el espectro de frecuencias de un espectro de frecuencias

Allí se vio que los picos del cepstrum reflejan las familias de bandas laterales (que tienen las frecuencias muy juntas) mientras que la quefrecy τ representa el tiempo o periodo de la modulación. En todo caso los picos del cepstrum no reflejan los valores de la amplitud de la vibración.

Estos resultados hacen muy útil el cepstrum para el diagnóstico de fallos (pero no para su detección) puesto que permite ver periodicidades que en el espectro normal no podrían visualizarse.

La figura 61 representa el espectro de frecuencias y el cepstrum de un engranaje deteriorado.

Como se ve contiene muchos armónicos y es imposible ver en el espectro de frecuencias si existen series de armónicos (armónicos muy juntos y especialmente bandas laterales) entre ellos.

En el cepstrum aparecen dos familias de bandas laterales claramente. Una a una quefrecy de 8,28 ms (120,7 Hz) y otra a 20,08 ms (49,8 Hz)

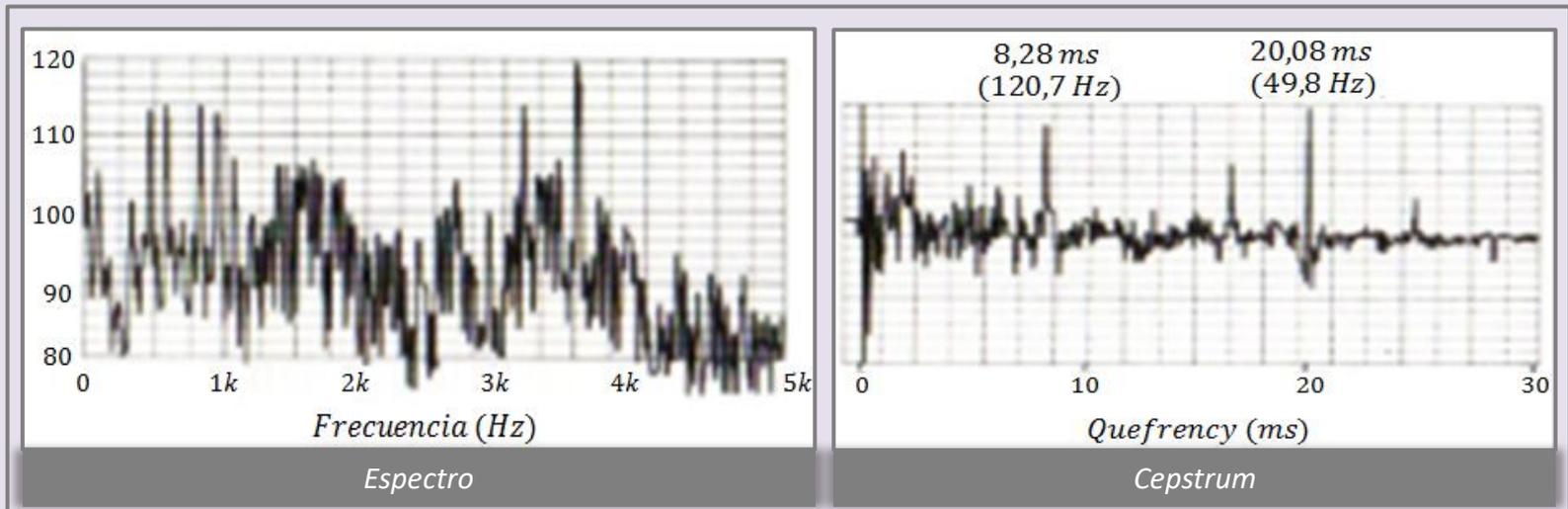


Fig. 61 Ejemplos de engranajes

5. ESPECTROS DE VIBRACIÓN DE ENGRANAJES

Espectro de engranajes en buen estado

En la figura 62 se muestra el espectro en frecuencias de un engranaje (rueda y piñón) en buen estado.

Pueden observarse las frecuencias 1x en la rueda y 1x en el piñón debidas a sus desequilibrios, además de la 2x debida a la posible excentricidad de los árboles.

También se observa la frecuencia de engrane (GMF) y las dos primeras bandas laterales.

Normalmente todas estas frecuencias tiene unas amplitudes bajas en un engranaje en buen estado

(En la figura se observa que este espectro representa las vibraciones radiales para los engranajes de dientes rectos y las vibraciones axiales para engranajes de dientes inclinados o helicoidales).

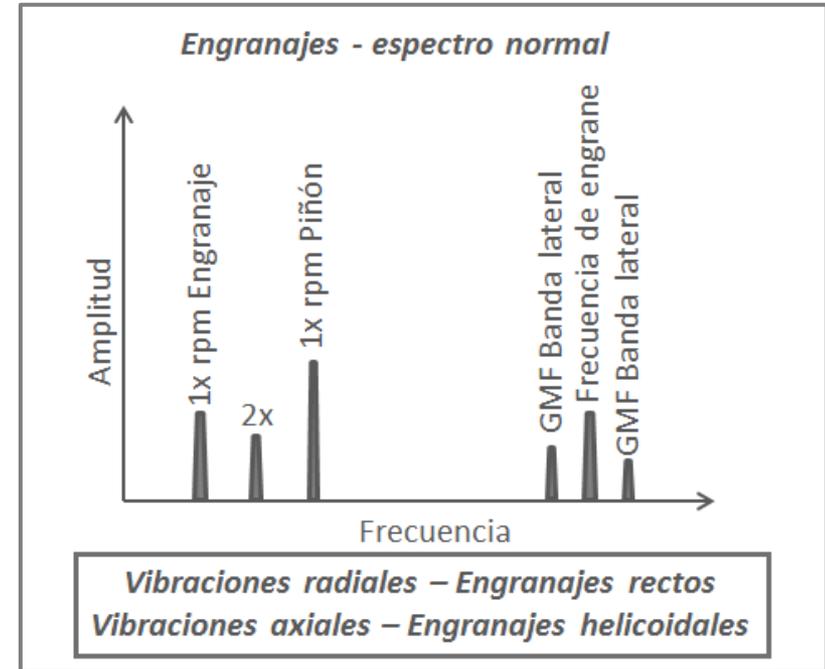


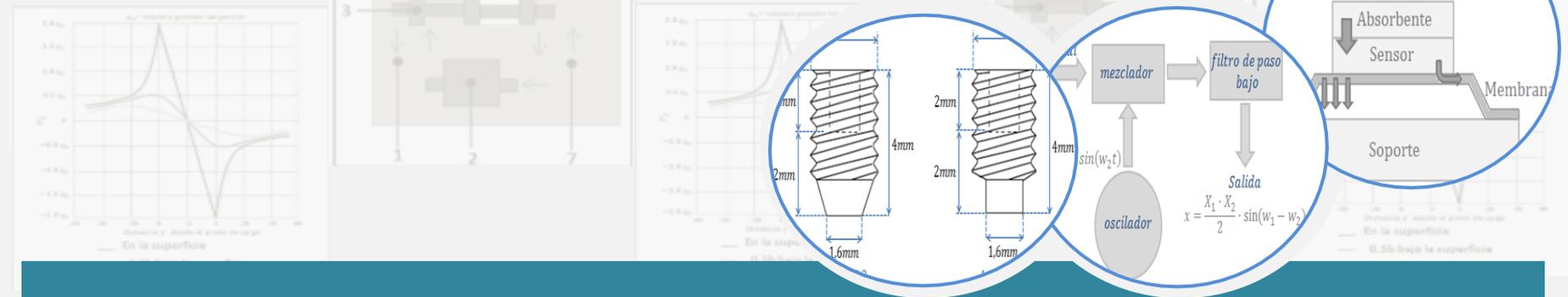
Fig. 62 Espectro de vibración de engranajes en buen estado

NOTA

Las sobrecargas en los engranajes nuevos no modifican las líneas del espectro sino solo incrementan su amplitud. Esto no supone ningún problema mientras que las amplitudes de las bandas laterales no se incrementen

MÓDULO 10

Técnicas variadas de detección de fallos en máquinas en servicio



TEMA 1

TÉCNICAS BASADAS EN EL ANÁLISIS DE INFRARROJOS (TERMOGRAFÍA)

PREÁMBULO

Este tema denominado TÉCNICAS BASADAS EN EL ANÁLISIS DE INFRARROJOS es el primero de los cuatro temas de los que consta el Módulo 10 TÉCNICAS VARIADAS DE DETECCIÓN DE FALLOS EN MÁQUINAS EN SERVICIO del Master de MANTENIMIENTO DE MÁQUINAS y se enmarca dentro de su segundo bloque CUERPO CENTRAL DE CONOCIMIENTOS SOBRE EL MANTENIMIENTO DE MÁQUINAS en el contexto de lograr una progresividad en el aprendizaje.

Este tema consta de cuatro partes:

- En la primera se realiza una introducción al uso de la radiación infrarroja en el mantenimiento de máquinas
- En la segunda se realiza una exposición del concepto y propiedades de estas radiaciones infrarrojas
- En la tercera parte se presentan los diversos equipos empleados para el análisis de las radiaciones infrarrojas
- En la cuarta parte se realiza una exposición de las aplicaciones del análisis termográfico en el campo de la detección de fallos de máquinas en servicio.

CONTENIDO DEL TEMA

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Introducción general

2. CONCEPTO Y PROPIEDADES DE LAS ONDAS INFRARROJAS

2.1. Recordatorio sobre transmisión de la energía térmica (calor)

2.2. Recordatorio sobre el espectro electromagnético

2.3. Radiación infrarroja o térmica

2.4. Características de las radiaciones infrarrojas (emisividad)

3. EQUIPOS DE MEDIDA Y ANÁLISIS DE LAS ONDAS INFRARROJAS

3.1. Generalidades

3.2. Pirómetros de infrarrojos

3.3. Cámaras termográficas

4. APLICACIONES DEL ANÁLISIS TERMOGRÁFICO

4.1. Campos de aplicación del análisis termográfico

4.2. Ventajas y desventajas del análisis termográfico

4.3. Etapas de un análisis de fallos con infrarrojos

3. EQUIPOS DE MEDIDA Y ANÁLISIS DE LAS ONDAS INFRARROJAS

3.1. Generalidades

Las radiaciones infrarrojas emitidas por un cuerpo caliente se recogen y procesan en un conjunto de equipos que la transforman en una medida de la temperatura, basándose para ello en la Ley de Stefan – Boltzmann que relaciona la emisividad del cuerpo caliente con su temperatura superficial.

La denominación genérica de estos equipos es la de pirómetros de radiación (pirómetros de infrarrojos o termómetros de infrarrojos) y de acuerdo a la longitud de onda captada por el sensor de radiación pueden clasificarse en pirómetros de banda ancha (o de radiación total) pues captan toda la energía encerrada bajo la curva correspondiente a una temperatura T , es decir, en todas sus longitudes de onda, o pirómetros de banda estrecha (pirómetros de brillo) que captan la energía correspondiente a una sola longitud de onda, o a una banda muy estrecha de estas.

De acuerdo al área del cuerpo donde se capta la temperatura se tiene los pirómetros como tales, que captan la radiación de un punto o área muy pequeña del cuerpo o cámaras termográficas, que captan la radiación de una amplia superficie del cuerpo, presentando una imagen térmica (temograma) del mismo.

De acuerdo al sensor de radiación que transforma la radiación incidente en otra magnitud capaz de ser medida existen pirómetros en los que la radiación infrarroja calienta un sensor y esta energía térmica absorbida se transforma luego en una corriente eléctrica (detectores térmicos o energéticos) como es el caso de las termopilas y los bolómetros (similares a los termistores, basados en la propiedad del cambio de resistencia eléctrica con la temperatura) y otros en los que la radiación captada se transforma directamente en una corriente eléctrica, como son las células fotoeléctricas y fotovoltaicas (detectores cuánticos o fotónicos). Los primeros se usan en pirómetros de banda ancha y los segundos para banda estrecha. En la práctica para el análisis de ondas infrarrojas solo se emplean los bolómetros y los fotoeléctricos.

En los Puntos 3.11, 3.12, 3.13 y 3.14 del Tema 3 del Módulo 3 se exponen los fundamentos de todos estos sensores, excepto los bolómetros

3. EQUIPOS DE MEDIDA Y ANÁLISIS DE LAS ONDAS INFRARROJAS

3.1. Generalidades

La ventaja de los detectores fotoeléctricos es que reaccionan muy rápidamente a los cambios de temperatura (pequeña constante de tiempo) pero su gran desventaja es que a temperatura ambiente ya se generan pequeñas cantidades de corriente, por lo que se precisa mantenerlos enfriados a baja temperatura (80°K). Con el tiempo se han desarrollado varios sistemas de enfriamiento, desde el uso de nitrógeno líquido hasta el enfriador criogénico Stirling. Con cualquiera de los procedimientos estos sensores requieren un cierto tiempo para alcanzar la temperatura adecuada.

Los bolómetros, por el contrario, aunque presentan una sensibilidad menor, no requieren enfriamiento y funcionan correctamente a temperatura ambiente. Constan de un elemento absorbente de la radiación infrarroja (emisividad próxima a la unidad), un sensor que normalmente es un material que cambia fácilmente su resistencia con la temperatura (metálico o semiconductor), un sustrato para proporcionar rigidez mecánica al conjunto y un soporte de todos ellos (figura 5).

Para disminuir las pérdidas de calor entre el sustrato y el soporte la conductancia térmica entre ambos debe ser muy baja, por lo cual se ha recurrido a membranas suspendidas, como se ve en la figura 5.

En la actualidad se fabrican bolómetros de semiconductores miniaturizados, utilizando técnicas de fabricación de circuitos impresos, que son los empleados en las cámaras termográficas.

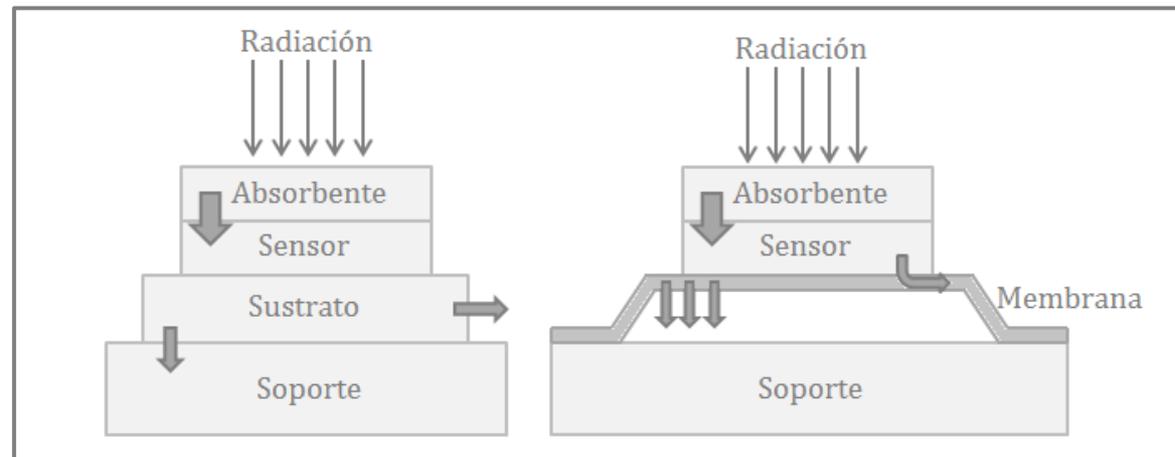


Fig. 5 Bolómetros

3. EQUIPOS DE MEDIDA Y ANÁLISIS DE LAS ONDAS INFRARROJAS

3.2. Pirómetros de infrarrojos

Los pirómetros de infrarrojos se componen de tres subsistemas: el subsistema óptico, el subsistema detector y el subsistema de tratamiento de la señal.

La figura 6 representa, esquemáticamente, un pirómetro de banda estrecha.

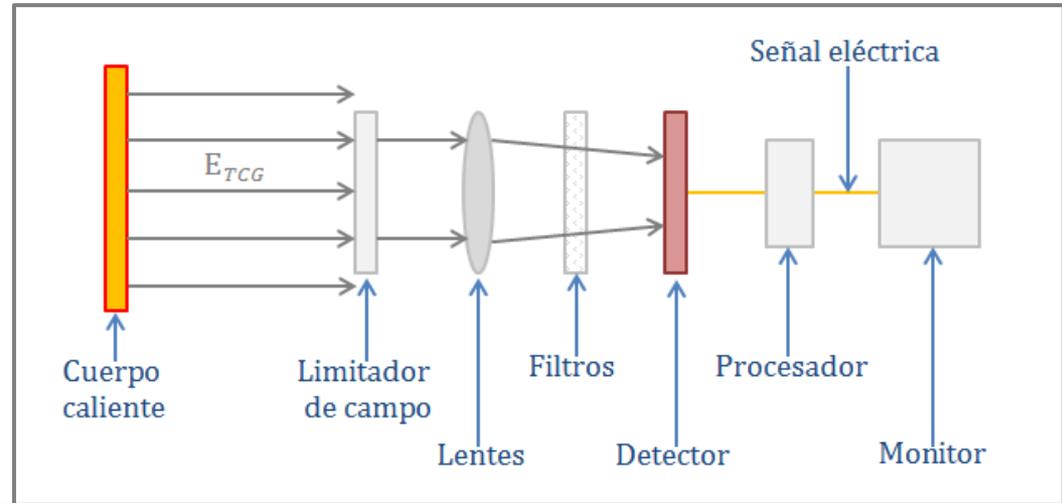


Fig. 6 Esquema de un pirómetro de infrarrojos de banda estrecha

El subsistema óptico está compuesto por un limitador de campo (ventana) que limita el área del cuerpo a analizar, unas lentes de enfoque del haz de infrarrojos y transparentes al mismo (de germanio, silicio o seleniuro de zinc), y una serie de filtros para seleccionar la longitud de onda.

El subsistema de detección está formado por una célula fotoeléctrica sensible al infrarrojo que transforma la radiación incidente en una corriente eléctrica y que tenga la propiedad de no ser sensible a los cambios de temperatura al incidir sobre ella (en muchos de estos sistemas se necesita refrigerar este elemento).

El subsistema de tratamiento de la señal consta esencialmente de un troceador de la señal procedente de la fotocélula (que puede ser un disco giratorio que interrumpe el haz) y que la convierte en una corriente alterna (en realidad, una corriente continua pulsada), amplificadores, demodulador para pasar la c.a. a c.c. para alimentar la electrónica incluyendo el monitor y el sistema de control de emisividad y de calibración.

3. EQUIPOS DE MEDIDA Y ANÁLISIS DE LAS ONDAS INFRARROJAS

3.3. Cámara termográfica

Una cámara termográfica es, esencialmente, un conjunto de pirómetros en los que la señal de salida es procesada hasta convertirla en una “imagen térmica o termograma”

El haz infrarrojo filtrado incide en una matriz (mosaico) de células fotoeléctricas (pixels) , cada una de las cuales recibe el rayo infrarrojo de la parte correspondiente del cuerpo caliente.

Estas células fotoeléctricas se construyen con diversos materiales, destacando las de Antimoniuro de Indio (InSb), Arseniuro de Indio y galio (InGaAs), Siliciuro de Platino (PtSi), telururo de Mercurio y cadmio (MCT), Óxido de Vanadio (VOx), Silicio Amorfo, Quantum Well Infrared Photodetector (QWIP). El empleo de cada uno depende del rango de infrarrojos que se pretenda cubrir y a la sensibilidad deseada.

El número de pixels de la resolución de la cámara y puede ser tan alto como 640 x 640 (equivalente a 307.200 pirómetros)

Esta tecnología se denomina Focal Plane Array (FPA) y tiene entre sus ventajas carecer de elementos móviles.

Las cámaras cuentan con un sistema de electrónico de barrido que actualiza la medición en cada pixel con una cierta frecuencia, dependiendo de las características térmicas del cuerpo observado.

La señal eléctrica procedente de cada pixel se envía al circuito electrónico de procesado que asigna una temperatura a cada punto del cuerpo, conformando un fichero de datos que puede ser almacenado en una memoria externa. Además el software empleado en estas cámaras permite realizar múltiples funciones con estos datos, como el cálculo de promedios, puntos de máxima y mínima temperaturas, etc.

Todos estos datos pueden ser presentados en un monitor en escala de grises o en colores simulados, conformando el denominado termograma. En el caso de grises se emplean colores oscuros para bajas temperaturas y colores más claros para las temperaturas altas. En el caso de paletas de colores se emplean los azules para las temperaturas más bajas, los rojos y amarillos para las temperaturas intermedias y el blanco para las más calientes.

3. EQUIPOS DE MEDIDA Y ANÁLISIS DE LAS ONDAS INFRARROJAS

3.3. Cámara termográfica

Para la utilización correcta de estas cámaras termográficas es necesario proceder a una serie de ajustes antes de tomar mediciones, unos relacionados con el tipo de cuerpo a inspeccionar (especialmente su emisividad) y otros con la situación del entorno de medida (temperatura y humedad del ambiente, iluminación, etc.)

La emisividad varía con el tipo de cuerpo y el estado de su superficie y a pesar de que existen tablas que dan estos valores para diferentes cuerpos (figura 7) siempre es necesario un ajuste en campo. Una forma de ajuste es colocar un adhesivo de emisividad conocida sobre el cuerpo y esperar a que se caliente a la misma temperatura que este (por conducción), midiendo la temperatura del adhesivo con la cámara. Luego se mide la temperatura de un punto próximo al adhesivo del cuerpo con la cámara y se ajustan sus parámetros hasta que ambas lecturas coincidan, quedando así la cámara termográfica calibrada.

En cuanto a las condiciones del entorno las cámaras termográficas son sensibles a los cambios de temperatura ambiente y a su posible falta de homogeneidad entre el punto de medida y la cámara, así como también al nivel existente de temperatura (si es mas alta que la del cuerpo emisor, la cámara no recogerá la temperatura de este)

NOTA

Es importante tener presente que las cámaras termográficas no miden temperaturas absolutas. Sin embargo lo que importa en la aplicación de la termografía al mantenimiento de máquinas es como varía el termograma a lo largo del tiempo de uso de la máquina, o dicho de otra manera, de la progresión del fallo en cualquier elemento de esta sometido a vigilancia

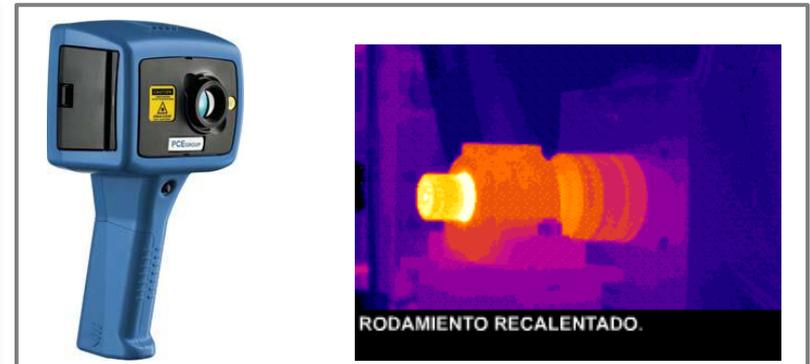
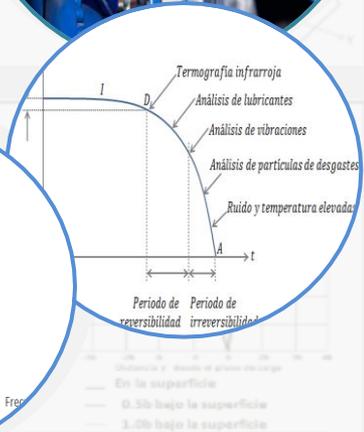
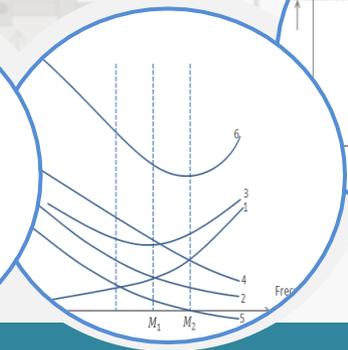
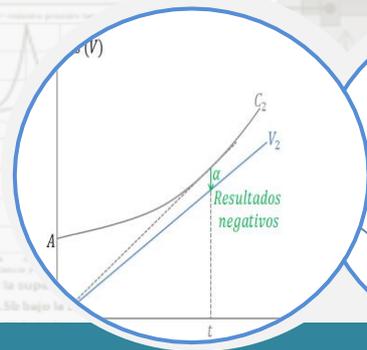
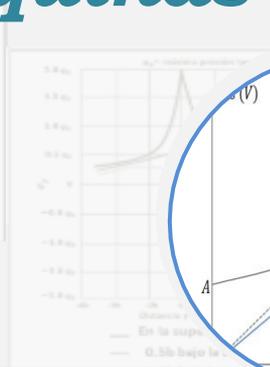
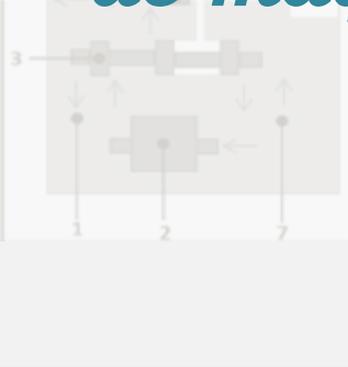
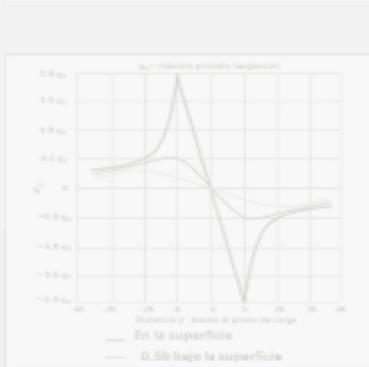


Fig. 7 Cámara termográfica

MÓDULO 11

Tipos y gestión del mantenimiento de máquinas



TEMA 5

GESTIÓN DEL MANTENIMIENTO EN RELACIÓN CON LA PRODUCCIÓN

PREÁMBULO

Este tema denominado GESTIÓN DEL MANENIMIENTO DE MÁQUINAS EN RELACIÓN CON LA PRODUCCIÓN es el quinto de los cinco temas de los que consta el Módulo 11 TIPOS Y GESTIÓN DEL MANTENIMIENTO DE MÁQUINAS del Master de MANTENIMIENTO DE MÁQUINAS y se enmarca dentro de su tercer bloque GESTIÓN DEL MANTENIMIENTO DE MÁQUINAS en el que culmina el master.

Este tema consta de seis partes:

- En la primera se especifican los objetivos del mantenimiento de máquinas en relación con la producción
- En la segunda se realiza una exposición relativa a los medios humanos puestos al servicio del mantenimiento de máquinas (tipos, características y exigencias)
- En la tercera se realiza un amplio estudio sobre los suministros de piezas y componentes para satisfacer las necesidades del mantenimiento de máquinas.
- En la cuarta parte se presentan algunos métodos que ayudan a seleccionar la técnica mas adecuada para efectuar el mantenimiento de máquinas pero sin considerar la producción de las mismas.
- En la quinta parte se presentan algunos métodos que ayudan a seleccionar la técnica mas adecuada para efectuar el mantenimiento de máquinas pero ahora considerando la producción de las mismas
- En la sexta parte se exponen los fundamentos de las estrategias de gestión globales mas utilizadas, pero solo con la intención de mostrar como los conocimientos implícitos en este Master pueden ayudar a su implementación

CONTENIDO DEL TEMA

1. OBJETIVOS DEL MANTENIMIENTO EN RELACIÓN CON LA PRODUCCIÓN

1.1. Generalidades

2. MEDIOS HUMANOS EN LA GESTIÓN DEL MANTENIMIENTO DE MÁQUINAS

2.1. Generalidades

3. SUMINISTROS PARA EL MANTENIMIENTO

3.1. Generalidades

3.2. Existencias de seguridad

3.3. Suministro mediante equipos nuevos. Canibalización

4. SELECCIÓN DE LOS MÉTODOS DE MANTENIMIENTO DE MÁQUINAS SIN RELACIÓN CON LA PRODUCCIÓN

4.1. Selección por árbol de decisiones

4.2. Selección por costes comparados

5. SELECCIÓN DE LOS MÉTODOS DE MANTENIMIENTO EN RELACIÓN CON LA PRODUCCIÓN

5.1. Introducción

5.2. Selección por coste global del ciclo de vida

6. GESTIÓN INFORMATIZADA DEL MANTENIMIENTO DE MÁQUINAS

6.1. Generalidades sobre el mantenimiento asistido por ordenador (GMAO)

6.2. Generalidades sobre el mantenimiento asistido por realidad aumentada

3. SUMINISTROS PARA EL MANTENIMIENTO

3.1. Generalidades

El mantenimiento de máquinas exige casi siempre la sustitución de ciertos elementos de la misma en un periodo de tiempo inferior al de duración de la máquina (su vida útil).

Se trata de componentes sometidos a desgastes y corrosiones inevitables (zapatas de frenos, neumáticos, etc.) u otros sometidos a roturas aleatorias por causas muy diversas (cojinetes, engranajes, etc.)

También exige el mantenimiento el uso de materiales y equipos destinados a las propias labores de mantenimiento, incluyendo lo de detección de los fallos, los de extracción y reposición de los elementos y los de reparación de los mismos.

Finalmente también deben considerarse los lubricantes, en sus diferentes modalidades.

En términos generales estos componentes pueden ser piezas o conjuntos de estas específicos del fabricante de la máquina o piezas corrientes estandarizadas, comunes a muchas máquinas, como pueden ser tornillos, rodamientos, etc.

Desde el punto de vista del mantenimiento es importante conocer la frecuencia con que se utilizan (se “consumen”) los diversos suministros. Las piezas de recambio que se utilizan mucho (se “mueven” mucho) no presentan importantes problemas a efectos de una gestión planificada de las existencias (“stok” de piezas de recambio), mientras que las que se mueven poco si exigen una adecuada planificación de las existencias y especialmente los denominados “recambios de seguridad” (si son muchas se acorta el periodo de reparación, pero aumenta el coste de almacenaje y de existencias, mientras que si son pocas se alarga el tiempo de reparación)

En cualquier caso una gestión adecuada de los suministros para el mantenimiento de maquinas exige una correcta definición de las piezas y elementos de las máquinas, así como la identificación de las mismas en el conjunto de la máquina.

3. SUMINISTROS PARA EL MANTENIMIENTO

3.1. Generalidades

En cuanto a la definición de las piezas y elementos de máquinas desde el punto e vista de la gestión del mantenimiento estas pueden clasificarse de acuerdo a su origen en:

- Pieza original que es la que coincide completamente con las características técnicas, dimensionales, controles de calidad, etc. definidas por el fabricante de la máquina.
- Pieza equivalente, que contiene todas las especificaciones de la pieza original pero es producida por otro fabricante que no es el de la máquina.
- Pieza intercambiable, que no contiene todas las características de la original pero que puede suplir las funciones de la original cuando se instala en la máquina
- Pieza adaptable, que no contiene todas las características de la original pero que puede suplir las funciones de la original siempre y cuando se le someta a una serie de adaptaciones

De acuerdo a la facilidad de ser sustituidas las piezas pueden clasificarse en:

- Pieza desmontable a mano (sin ayuda de herramientas o con ayuda de herramientas sencillas, como llaves de mano, destornilladores, etc.)
- Pieza desmontable, cuyo desmontaje y colocación puede realizarse pero recurriendo a medios adecuados (asociados al diseño de la máquina)

En cuanto a la identificación de las piezas con vistas a su mantenimiento es necesario disponer de un catálogo de todas y cada una de las piezas de la máquina que las identifique sin ambigüades (aunque existan varias piezas idénticas pero que se encuentren situadas en puntos distintos de la máquina) para facilitar la emisión de pedidos, su almacenaje, el aprovisionamiento cuando se necesitan, etc.

Estos catálogos deben ir acompañados de planos de despiece para facilitar la localización de las piezas en los diferentes parte de la máquina (figura xx)

3. SUMINISTROS PARA EL MANTENIMIENTO

3.1. Generalidades

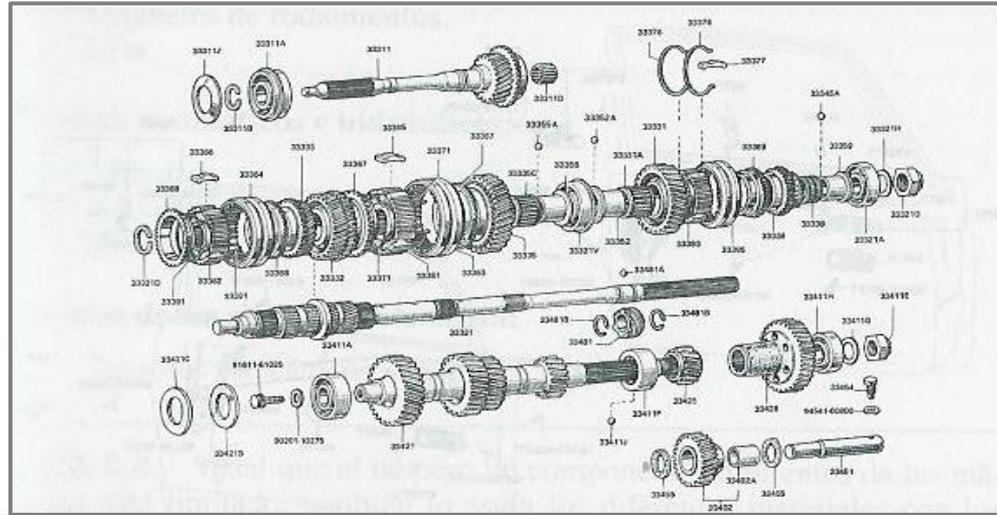


Fig. 22 Componentes de la caja de cambios

En el Punto 3 del Tema 3 del Módulo 0 de este Master en Mantenimiento de Máquinas se expone una nomenclatura ortodoxa de los diferentes componentes de las máquinas, distinguiendo entre pieza (parte indivisible), miembro (conjunto de piezas unidas entre si sin movimiento entre ellas, par (unión de dos miembros con movimiento entre ellos, mecanismo (conjunto de pares unidos entre sí y máquina (compuesta por uno o varios mecanismos)

3. SUMINISTROS PARA EL MANTENIMIENTO

3.2. Existencias de seguridad

En el mantenimiento de máquinas una cuestión importante es si debe mantenerse o no un stock de piezas de recambio y en el caso de respuesta positiva, cuantas piezas debe contener.

Como es lógico ello depende de múltiples factores entre los que destacan la fiabilidad de las piezas (de la probabilidad de fallo), de la mantenibilidad de las mismas, del impacto sobre la producción (de la pérdida de producción por retardo en el suministro de la pieza), del coste de la misma (no solo del coste individual sino también el de su estocaje).

Para una primera determinación de las existencias de seguridad puede seguirse el siguiente método:

En primer lugar agrupar las piezas de la máquina en las siguientes cinco categorías:

1. Piezas (o mecanismos) de soporte de elementos móviles, como cojinetes de fricción, rodamientos, anillas de cierre, etc. (en general son elementos de máquinas sometidos a fuertes desgastes)
2. Piezas móviles, como ejes, rotores
3. Piezas (o mecanismos) de transmisión de movimiento, como engranajes, bombas, bielas, vástagos, etc.
4. Piezas estructurales como bastidores, bases y soportes, etc.
5. Piezas electrónicas (componentes electrónicos indivisibles o no)

En segundo lugar puede asignarse a cada uno de los grupos anteriores los siguientes stocks (para máquinas funcionando a plena carga):

- 1ª categoría: 1 pieza de recambio por cada 4 piezas instaladas en la máquina
- 2ª categoría: 1 pieza de recambio por cada 5 instaladas en la máquina
- 3ª categoría: 1 pieza de recambio por cada 10 piezas instaladas en la máquina
- 4ª categoría: 1 pieza de recambio por cada 20 instaladas en la máquina
- 5ª categoría: ninguna

En el caso de n máquinas idénticas las existencias anteriores deben multiplicarse por \sqrt{n}

3. SUMINISTROS PARA EL MANTENIMIENTO

3.2. Existencias de seguridad

Una determinación mas afinada debe realizarse cuando el coste de la indisponibilidad de la máquina (pérdida de producción) " C_{IND} " sea elevado respecto del coste de las piezas a mantener en stock " C_{PS} ", para un número de años de vida de la máquina " N ".

Esto depende de dos factores principalmente: de la fiabilidad de los elementos a mantener en stock (probabilidad de fallo a lo largo del los " N " años) y del coste anual de almacenamiento (expresado como un % del coste de compra de la pieza) o coste de posesión " C_{POS} " que incluye el capital inmovilizado y el coste del almacenamiento físico de las piezas)

Si la probabilidad de fallo en el tiempo " N " es " $F(N)$ " la fiabilidad (probabilidad de no fallo será " $1 - F(N)$ "

En el caso de existencia de la pieza fallada en stock esta será utilizada en el momento posterior al fallo y los costes incurridos serán los de la propia pieza mas el de reposición " C_{RP} ", o sea " $C_{PS} + C_{RP}$ "

Si la pieza fallada no se encuentra en stock supone un retraso en su aprovisionamiento lo cual implica un coste de indisponibilidad. En este caso el coste total será: " $C_{PS} + C_{RP} + C_{IND}$ "

En ambos casos el coste de almacenamiento será: " $C_{PS} \times C_{POS} \times N$ "

De acuerdo a los valores anteriores se tendrá en el caso de no producirse fallos en los " N " años un coste sin almacenamiento " $C_1 = 0$ " y un coste con almacenamiento " $C_2 = C_{PS}(1 + C_{POS} \times N)$ "

En el caso de producirse fallos con la probabilidad " $F(N)$ " se tendrá un coste sin almacenamiento: " $C_1 = F(N) \times (C_{PS} + C_{RP} + C_{IND})$ " y otro con almacenamiento:

" $C_2 = C_{PS}(1 + C_{POS} \times N) + (C_{PS} + C_{RP}) \cdot F(N)$ "

3. SUMINISTROS PARA EL MANTENIMIENTO

3.2. Existencias de seguridad

El coste diferencial será: $C_1 - C_2 = C_{IND} \times F(N) \times C_{PS}(1 + C_{POS} \times N)$

La probabilidad “ $F(N)$ ” que hace “ $C_1 = C_2$ ” será: $F(N) = (C_{IND}/C_{PS}) \times (1 + C_{POS} \times N)$

Si la probabilidad estimada de fallo para la pieza almacenada es mayor que “ $F(N)$ ” debe disponerse de las mismas en stock. Caso contrario, no.

El término $(1 + C_{POS} \times N)$ puede valorarse en función del coste de posesión (expresado en % del coste de compra de la pieza y del número de años de duración con los siguientes valores:

	5 años	10 años	15 años	20 años
5%	1,25	1,5	1,75	2
10%	1,5	2,	2,5	3
15%	1,75	2,5	3,25	4
20%	2	3	4	5

Tabla 4. Existencias de seguridad

NOTA

Existen procedimientos mas exactos para evaluar las existencias de seguridad pero de salen de los objetivos conceptuales de este master

3. SUMINISTROS PARA EL MANTENIMIENTO

3.3. Suministros mediante equipos nuevos. Canibalización

Existe un cierto número de máquinas que exigen un elevado número de piezas de recambio durante su vida útil, algunas de ellas de un alto coste unitario, como es el caso de herramientas portátiles, taladradoras neumáticas, martillos de perforación, hormigoneras, etc.

En estos casos el mantenimiento de existencias de seguridad puede no tener sentido, hasta el punto de que sea preferible adquirir una máquina nueva en lugar de proceder a reponer la pieza averiada (En general es sabido que cuesta mas una máquina rehecha a base de piezas de recambio que la propia máquina nueva)

- Suponiendo una máquina compuesta por seis piezas, 2, 2, 3, 4, 5 y 6
- Suponiendo que los costes de cada pieza (costes unitarios) sean respectivamente " C_1, C_2, C_3, C_4, C_5 y C_6 "
- Suponiendo que la pieza 1 haya de cambiarse " n_1 " veces en su vida útil, " n_2 " la pieza 2 y así sucesivamente

Con tales valores puede construirse el gráfico de la figura 31 donde en abscisas se representan los valores " n_1, n_2 ", etc. y en ordenadas los costes unitarios " C_1, C_2 ", etc.

Se tienen así una serie de rectángulos, cuyas superficies representan los costes de los " n_1 " repuestos de coste unitario " C_1 ", los " n_2 " repuestos de coste unitario " C_2 ", etc.

(Como se ve la pieza 1 es la mas cara y se ha cambiado el menor número de veces)

En el gráfico se ha representado una línea horizontal " M " que representa el coste de una máquina nueva. Como se ve en este supuesto este coste es menor que la suma de los costes unitarios de todas las piezas que componen la máquina.

Como se aprecia esta línea corta al rectángulo de la pieza 2. con coste " C_2 " y que ha de ser cambiada en la vida útil de la máquina n_2 veces.

Ello significa que la sustitución de la pieza 2 " n_2 " veces cuesta lo mismo que la compra de " n_2 " máquinas nuevas (cuyo coste es $M \cdot n_2$)

El área rayada de la figura (A) es el ahorro conseguido con esta operación

3. SUMINISTROS PARA EL MANTENIMIENTO

3.3. Suministros mediante equipos nuevos. Canibalización

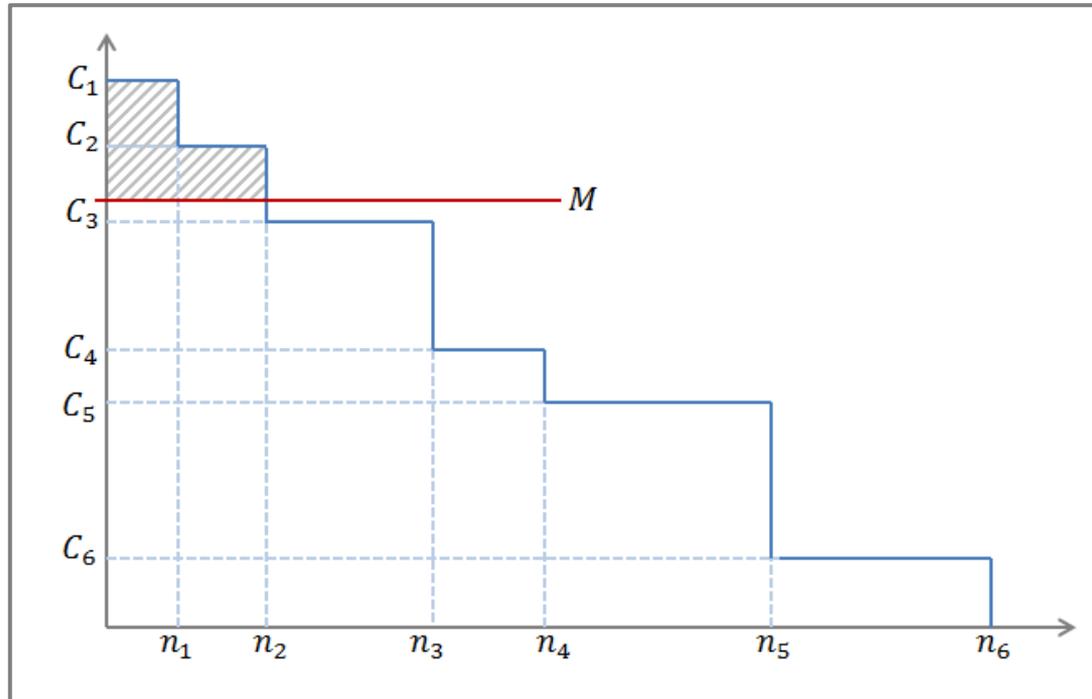


Fig. 23 Canibalización

Si las n_2 máquinas nuevas sustituyen a las n_2 usadas se tendrá un elevado número de piezas en buen estado que podrán ser utilizadas en forma prioritaria, con lo cual el beneficio es aún mayor.

De acuerdo con lo visto las piezas 1 y 2 no deben ser adquiridas individualmente (en la práctica las piezas que no deben ser compradas son las más caras)

3. SUMINISTROS PARA EL MANTENIMIENTO

3.3. Suministros mediante equipos nuevos. Canibalización

El desmontaje de las piezas de las máquinas sustituidas y que pueden ser reutilizadas forman parte del proceso llamado canibalización, aún cuando este alcanza su máximo significado en el caso de que el número de equipos necesarios disminuya a lo largo del tiempo (por ejemplo, por sustitución de equipos mas modernos).

En este caso puede ocurrir que no sea necesaria la compra de máquinas nuevas y un ahorro importante de compra de piezas de recambio para aquellas que se mantengan en servicio.

La canibalización permite prolongar la vida de máquinas para las que ya no se encuentren piezas de recambio (por dejar de fabricarse, por bloqueos de suministro, etc.), así como permite un paso gradual de un parque de máquinas antiguas por otras mas modernas.

5. SELECCIÓN DE LOS MÉTODOS DE MANTENIMIENTO EN RELACIÓN CON LA PRODUCCIÓN

5.1. Introducción

La selección del método de mantenimiento más adecuado realizado en el punto anterior se basa exclusivamente en los aspectos técnicos, de seguridad y económicos relativos a las propias labores de mantenimiento.

Sin embargo el mantenimiento de las máquinas tienen una enorme incidencia en su producción y con ella en las ventas y los beneficios empresariales, hasta el punto que la aplicación de una técnica incorrecta puede conducir a la ruina de la propia empresa.

En este punto se van a analizar los aspectos que relacionan el mantenimiento de máquinas con la producción de las mismas, y con la rentabilidad empresarial y en particular aspectos tales como la comparación desde este punto de vista de las diferentes técnicas de mantenimiento, la vida óptima de una máquina (de su sustitución), etc.

Para una mejor comprensión de lo expuesto se presenta el caso de costes comparados del punto 4 anterior, añadiéndole otros valores como pueden ser los costes indirectos derivados del mantenimiento (costes de indisponibilidad, que repercuten en pérdidas de producción y otros) y la propia depreciación de los equipos, todo lo cual de una permite una mejor selección de la combinación óptima de las técnicas de mantenimiento empleadas.

En la figura 25 se muestra la nueva situación:

- En ella la curva 1 representa los costes del mantenimiento correctivo (ineludible, aún cuando exista el programado) el cual disminuye en la medida que aumente el programado
- La curva 2 representa los costes del mantenimiento programado el cual se incrementa cuantas más operaciones de este tipo se realicen
- La curva 3 representa el coste total del mantenimiento (1+2)
- La curva 4 representa los costes indirectos derivados del mantenimiento programado y de los eventuales correctivos los cuales disminuyen al aumentar el mantenimiento programado

5. SELECCIÓN DE LOS MÉTODOS DE MANTENIMIENTO EN RELACIÓN CON LA PRODUCCIÓN

5.1. Introducción

- La curva 5 representa la depreciación de los equipos los cuales se deprecian tanto menos cuanto mas alto sea el mantenimiento programado (pudiendo alcanzar un valor residual positivo).
- La curva 6 representa los costes globales para la empresa (3+4+5)

Como se ve en la figura el coste total del mantenimiento que presentaba un mínimo en el punto M_1 (punto óptimo técnico de mantenimiento) ahora se ve desplazado hacia la derecha, hasta el punto M_2

Ello significa que la combinación óptima técnica casi nunca coincide con la combinación óptima para la empresa.

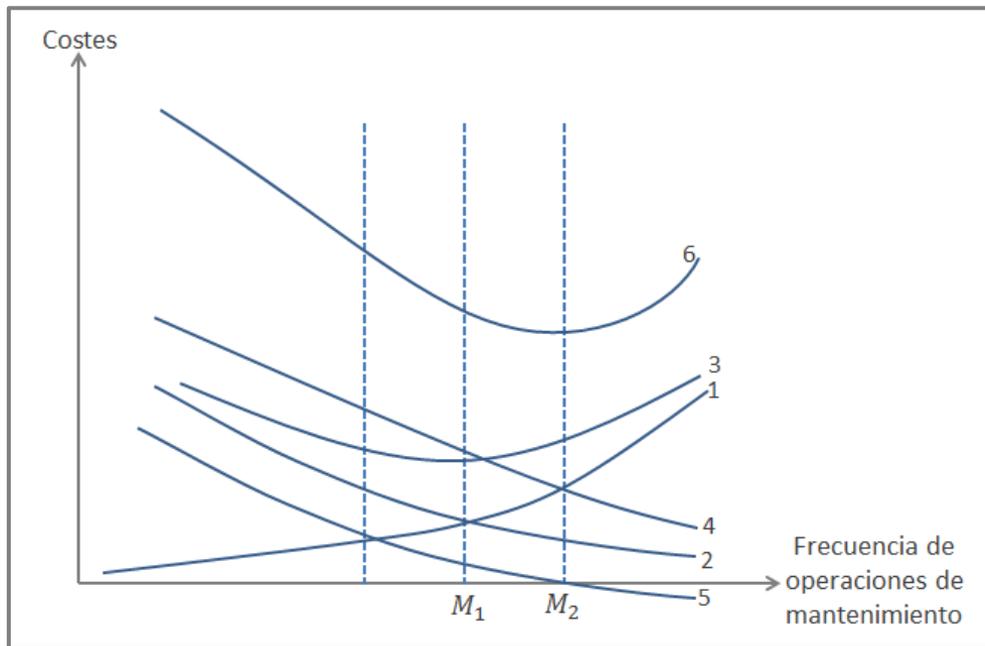


Fig. 25 Ejemplo de "política de mantenimiento de máquinas"

NOTA

Es importante señalar que en este Master de Mantenimiento de Máquinas no se abordan las técnicas de definición y planificación de las estrategias de mantenimiento que deben llevarse a cabo en una empresa para optimizar su producción y sus beneficios (como pueden ser TPM, RCM u otras)

Por tanto lo que se expone en este punto no debe ser considerado mas que una especie de ligazón entre el contenido del master y tales métodos

5. SELECCIÓN DE LOS MÉTODOS DE MANTENIMIENTO EN RELACIÓN CON LA PRODUCCIÓN

5.2. Selección por coste global del ciclo de vida

El método de gestión del mantenimiento más simple es el denominado “coste global del ciclo de vida” de la máquina (life cycle cost), el cual tiene en cuenta los gastos en mantenimiento y las producciones a lo largo de toda la vida de la máquina.

Este coste global, expresado en moneda constante, está compuesto por tres factores:

1. El coste de adquisición de la máquina (o conjunto de estas, en su caso) “ C_A ” que se va a suponer en este caso distribuido uniformemente en el tiempo de vida de la máquina
2. Los gastos de utilización de la máquina, que comprenden los costes acumulados de funcionamiento (operarios, suministros, etc.) “ C_F ” y los costes acumulados de mantenimiento correspondientes al método de mantenimiento seleccionado “ C_M ”
3. El total acumulado de las ventas (ingresos) de la producción “ V ”

De acuerdo con lo anterior el resultado de la explotación para toda la vida útil de la máquina será:

$$R = V - (C_A + C_F + C_M)$$

La suma ($C_A + C_F + C_M$) son los costes globales CG:

$$R = V - CG$$

5. SELECCIÓN DE LOS MÉTODOS DE MANTENIMIENTO EN RELACIÓN CON LA PRODUCCIÓN

5.2. Selección por coste global del ciclo de vida

En la figura 26 se han representado todos estos valores señalando al respecto que los gastos de funcionamiento son idénticos cada año (recta de C_F) y los gastos de mantenimiento se incrementan al paso del tiempo (curva C_M).

También se ha supuesto una producción V constante en el tiempo cuya pendiente representa la tasa anual de ventas.

(En la realidad la curva de Costes Globales no es continua, presentando discontinuidades correspondientes a las acciones más importantes de mantenimiento).

Como se ve la recta de las ventas V corta a la curva de costes Globales CG en dos puntos, el "a" y el "b", respectivamente en los tiempos " T_1 " y " T_2 " de la vida de la máquina TF. En esos dos puntos el resultado de la explotación es cero.

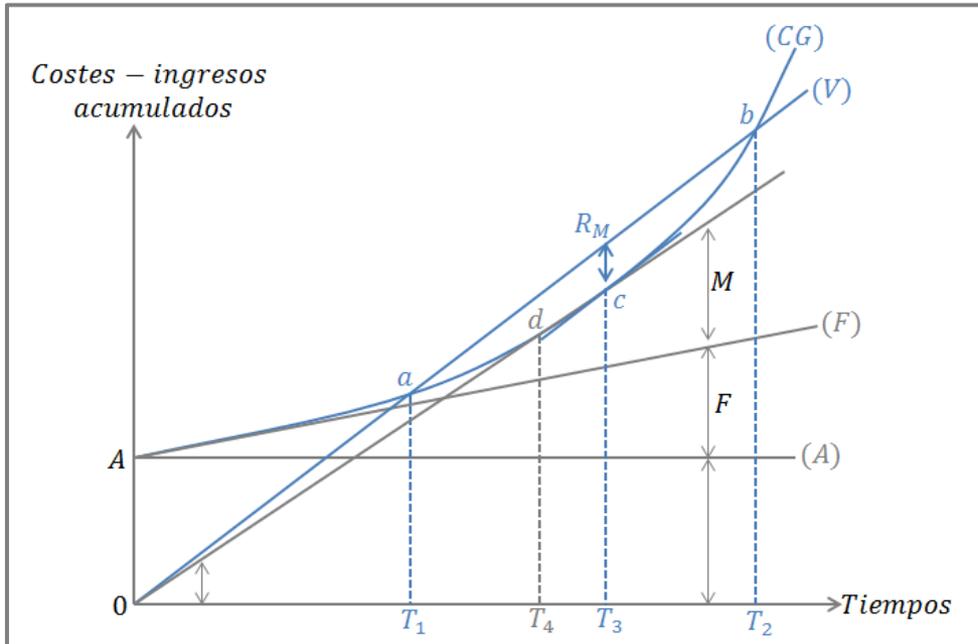


Fig. 26 Coste global del ciclo de vida

- Antes de " T_1 " el resultado es negativo (pérdidas en la explotación)
- Entre " T_1 " y " T_2 " el resultado es positivo (ganancias de la explotación)
- Después de " T_2 " el resultado vuelve a ser negativo

5. SELECCIÓN DE LOS MÉTODOS DE MANTENIMIENTO EN RELACIÓN CON LA PRODUCCIÓN

5.2. Selección por coste global del ciclo de vida

En el gráfico también se presentan otros dos puntos de especial interés:

- El punto "c", correspondiente al tiempo " T_3 " de la vida de la máquina, donde los resultados de la explotación alcanzan el máximo valor, obtenido trazando la tangente a la curva de CG que es paralela a V.
- El punto "d", correspondiente al tiempo " T_4 ", donde el resultado acumulado por unidad de tiempo es máximo (tangente a la curva de CG trazada desde el origen) (esta pendiente se ha representado por el ángulo α). Es importante tener en cuenta que este tiempo " T_4 ", y el consecuente valor de α , no depende de los ingresos acumulados (línea V que en la figura presenta una pendiente mas alta) sino solo de los costes globales acumulados. Obviamente en el tiempo en que se produce el máximo resultado acumulado por unidad de tiempo se produce el coste global mínimo también por unidad de tiempo.

También podrían definirse un coste global medio " CG_m " dado por:

$$CG_m = CG/T_F$$

representando el punto "d" (tiempo " T_4 ") su valor mínimo

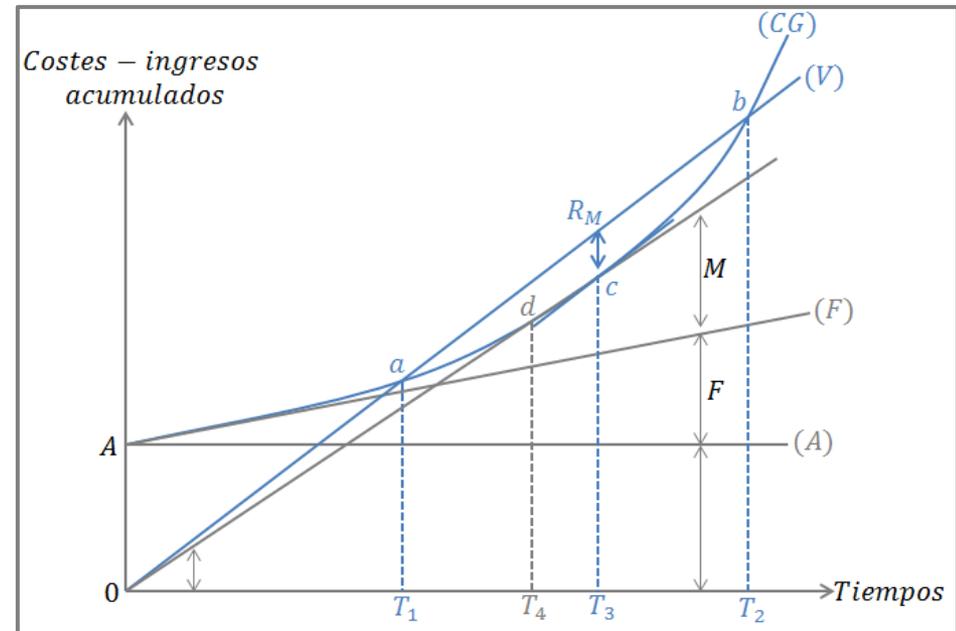


Fig. 26 Coste global del ciclo de vida

ICL

Si Usted esta interesado en una mayor información sobre cualquiera de los temas de este master de cara a una selección para cursar solamente los de su interés no dude en ponerse en contacto con nosotros

CONTACTO



INGENIERÍA CALERO LUNA

DIRECCIÓN:
Avda. Alcalde Ramírez Bethencourt Nº21
35004 Las Palmas de Gran Canaria
España

CONTACTO:
ingenieriacaleroluna@gmail.com