



Universidad Carlos III de Madrid
Área de Ingeniería Mecánica

MANTENIMIENTO

INDUSTRIAL

Autor:

M^a Belén Muñoz Abella



MANTENIMIENTO INDUSTRIAL

1	INTRODUCCIÓN.....	3
2	HISTORIA DEL MANTENIMIENTO.....	3
3	CONCEPTO Y OBJETIVOS DEL MANTENIMIENTO INDUSTRIAL.....	4
4	TIPOS DE MANTENIMIENTO.....	5
	4.1 Mantenimiento correctivo	
	4.2 Mantenimiento preventivo	
	4.3 Mantenimiento predictivo	
	4.4 Mantenimiento productivo total (Total Productive Maintenance TPM)	
5	CONCEPTOS ASOCIADOS AL MANTENIMIENTO. FIABILIDAD.....	8
	5.1 Evolución de la tasa de fallos a lo largo del tiempo. Curva de bañera	
	5.2 Tiempo medio entre fallos (MTBF).	
	5.3 Tiempo medio hasta la avería (MTTF)	
	5.4 Modelos matemáticos de distribución de probabilidad de fallos	
	5.4.1 Ley exponencial de fallos. Tasa de fallos constante	
	5.4.2 Ley de Weibull. Tasa de fallos crecientes y decrecientes	
	5.5 Fiabilidad de sistemas	
6	CONCEPTOS ASOCIADOS AL MANTENIMIENTO. MANTENIBILIDAD.....	16
	6.1 Media de los tiempos técnicos de reparación	
7	CONCEPTOS ASOCIADOS AL MANTENIMIENTO. DISPONIBILIDAD.....	18
8	PLANIFICACIÓN DEL MANTENIMIENTO INDUSTRIAL.....	20
	8.1 Introducción	
	8.2 Políticas de Mantenimiento: Preventivo y Correctivo	
	8.2.1 Reparación o sustitución a intervalo fijo antes del fallo	
	8.2.2 Mantenimiento según condición	
	8.2.3 Mantenimiento de oportunidad	
	8.2.4 Operación hasta fallo y mantenimiento correctivo	
	8.2.5 Mantenimiento modificativo	
	8.2.6 Operación hasta fallo y mantenimiento correctivo	
	8.3 Plan de Mantenimiento	
	8.3.1 Clasificación e identificación de equipos	
	8.3.2 Recogida de información	



- 8.3.3 Selección de la política
- 8.3.4 Programa de Mantenimiento preventivo
- 8.3.5 Programa de mantenimiento correctivo

9 MANTENIMIENTO SEGÚN CONDICIÓN O ESTADO.....28

- 9.1 Tipos de control o condición de estado
- 9.2 Métodos de control o condición de estado
 - 9.2.1 Técnicas de control en marcha
 - 9.2.2 Técnicas de control en parada
- 9.3 Control de lubricantes
- 9.4 Control de temperatura
 - 9.4.1 Localización de las medidas de temperatura
 - 9.4.2 Instrumentos para el control de temperatura
 - 9.4.3 Averías detectables mediante el control de temperatura
- 9.5 Monitorización de vibraciones y ruido
 - 9.5.1 Elección entre medida de ruido o vibración
 - 9.5.2 El equipo
 - 9.5.3 La vibración o señal de ruido
 - 9.5.4 Técnicas prácticas de monitorización de vibraciones
 - 9.5.5 Localización de los puntos de medición y montajes de transductores
 - 9.5.6 Análisis de frecuencias
 - 9.5.7 Monitorización de señales pico
- 9.6 Métodos de diagnóstico en el mantenimiento predictivo
 - 9.6.1 Diagnóstico basado en modelos
 - 9.6.2 Mantenimiento predictivo basado en sistemas expertos
 - 9.6.3 Mantenimiento predictivo basado en redes neuronales

10 BIBLIOGRAFÍA.....47



1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la mayor parte de los bienes y servicios se obtienen y se hacen llegar a sus destinatarios mediante unos “sistemas de producción-distribución” o, más brevemente “*sistemas productivos*”, a menudo de gran dimensión tanto por el número de personas que trabajan en ellos como por el tamaño y el valor de las instalaciones y equipos que utilizan.

A lo largo de su ciclo de vida cada sistema pasa por diferentes fases. La última de ellas es la de construcción y puesta en marcha, hasta que se alcanza el régimen normal de funcionamiento.

Durante esta última fase, llamada de operación, que es la única auténticamente productiva, el sistema se ve sometido a fallos que entorpecen o, incluso, interrumpen temporal o definitivamente su funcionamiento.

El objeto del mantenimiento es, precisamente, reducir la incidencia negativa de dichos fallos, ya sea disminuyendo su número o atenuando sus consecuencias.

Decimos que algo falla cuando deja de brindarnos el servicio que debía darnos o cuando aparecen efectos indeseables, según las especificaciones de diseño con las que fue construido o instalado el bien en cuestión.

En general, todo lo que existe, especialmente si es móvil, se deteriora, rompe o falla con el correr del tiempo. Puede ser a corto plazo o a muy largo plazo. El solo paso del tiempo provoca en algunos bienes, disminuciones evidentes de sus características, cualidades o prestaciones.

2. HISTORIA DEL MANTENIMIENTO

La palabra mantenimiento se emplea para designar las técnicas utilizadas para asegurar el correcto y continuo uso de equipos, maquinaria, instalaciones y servicios. Para los hombres primitivos, el hecho de afilar herramientas y armas, coser y remendar las pieles de las tiendas y vestidos, cuidar la estanqueidad de sus piraguas, etc.

Durante la revolución industrial el mantenimiento era correctivo (de urgencia), los accidentes y pérdidas que ocasionaron las primeras calderas y la apremiante intervención de las aseguradoras exigiendo mayores y mejores cuidados, proporcionaron la aparición de talleres mecánicos.

A partir de 1925, se hace patente en la industria americana la necesidad de organizar el mantenimiento con una base científica. Se empieza a pensar en la conveniencia de reparar antes de que se produzca el desgaste o la rotura, para evitar interrupciones en el proceso productivo, con lo que surge el concepto del mantenimiento Preventivo.

A partir de los años sesenta, con el desarrollo de las industrias electrónica, espacial y aeronáutica, aparece en el mundo anglosajón el mantenimiento Predictivo, por el cual la



intervención no depende ya del tiempo de funcionamiento sino del estado o condición efectiva del equipo o sus elementos y de la fiabilidad determinada del sistema.

Actualmente el mantenimiento afronta lo que se podría denominar como su tercera generación, con la disponibilidad de equipos electrónicos de inspección y de control, sumamente fiables, para conocer el estado real de los equipos mediante mediciones periódicas o continuas de determinados parámetros: vibraciones, ruidos, temperaturas, análisis físico-químicos, tecnografía, ultrasonidos, endoscopia, etc., y la aplicación al mantenimiento de sistemas de información basados en ordenadores que permiten la acumulación de experiencia empírica y el desarrollo de los sistemas de tratamiento de datos. Este desarrollo, conducirá en un futuro al mantenimiento a la utilización de los sistemas expertos y a la inteligencia artificial, con amplio campo de actuación en el diagnóstico de averías y en facilitar las actuaciones de mantenimiento en condiciones difíciles.

Por otra parte, existen cambios en las políticas de mantenimiento marcados por la legislación sobre Seguridad e Higiene en el Trabajo y por las presiones de Medio Ambiente, como dispositivos depuradores, plantas de extracción, elementos para la limitación y atenuación de ruidos y equipos de detección, control y alarma.

Se vaticina que los costes de mantenimiento sufrirán un incremento progresivo, esto induce a la fabricación de productos más fiables y de fácil mantenimiento.

3. CONCEPTO Y OBJETIVOS DEL MANTENIMIENTO INDUSTRIAL

El mantenimiento se puede definir como el control constante de las instalaciones (en el caso de una planta) o de los componentes (en el caso de un producto), así como el conjunto de trabajos de reparación y revisión necesarios para garantizar el funcionamiento regular y el buen estado de conservación de un sistema en general.

Por lo tanto, las tareas de mantenimiento se aplican sobre las instalaciones fijas y móviles, sobre equipos y maquinarias, sobre edificios industriales, comerciales o de servicios específicos, sobre las mejoras introducidas al terreno y sobre cualquier otro tipo de bien productivo.

El objetivo final del mantenimiento industrial se puede sintetizar en los siguientes puntos:

- Evitar, reducir, y en su caso, reparar, las fallos sobre los bienes
- Disminuir la gravedad de las fallos que no se lleguen a evitar
- Evitar detenciones inútiles o paros de máquinas.
- Evitar accidentes.
- Evitar incidentes y aumentar la seguridad para las personas.



- Conservar los bienes productivos en condiciones seguras y preestablecidas de operación.
- Reducir costes.
- Alcanzar o prolongar la vida útil de los bienes.

En resumen, un mantenimiento adecuado, tiende a prolongar la vida útil de los bienes, a obtener un rendimiento aceptable de los mismos durante más tiempo y a reducir el número de fallos.

4. TIPOS DE MANTENIMIENTO

Actualmente existen variados sistemas para acometer el servicio de mantenimiento de las instalaciones en operación. Algunos de ellos no solamente centran su atención en la tarea de corregir los fallos, sino que también tratan de actuar antes de la aparición de los mismos haciéndolo tanto sobre los bienes, tal como fueron concebidos, como sobre los que se encuentran en etapa de diseño, introduciendo en estos últimos, las modalidades de simplicidad en el diseño, diseño robusto, análisis de su mantenibilidad, diseño sin mantenimiento, etc.

Los tipos de mantenimiento que se van a estudiar son los siguientes:

- Mantenimiento correctivo
- Mantenimiento preventivo
- Mantenimiento predictivo
- Mantenimiento productivo total

4.1. *Mantenimiento correctivo*

Es el conjunto de actividades de reparación y sustitución de elementos deteriorados por repuestos que se realiza cuando aparece el fallo.

Este sistema resulta aplicable en sistemas complejos, normalmente componentes electrónicos o en los que es imposible predecir los fallos y en los procesos que admiten ser interrumpidos en cualquier momento y durante cualquier tiempo, sin afectar la seguridad. También para equipos que ya cuentan con cierta antigüedad.

Tiene como inconvenientes, que el fallo puede sobrevenir en cualquier momento, muchas veces, el menos oportuno, debido justamente a que en esos momentos se somete al bien a una mayor exigencia.



Asimismo, fallos no detectadas a tiempo, ocurridos en partes cuyo cambio hubiera resultado de escaso coste, pueden causar daños importantes en otros elementos o piezas conexos que se encontraban en buen estado de uso y conservación.

Otro inconveniente de este sistema, es que se debe disponer de un capital importante invertido en piezas de repuesto.

4.2. Mantenimiento preventivo

Es el conjunto de actividades programadas de antemano, tales como inspecciones regulares, pruebas, reparaciones, etc., encaminadas a reducir la frecuencia y el impacto de los fallos de un sistema.

Las desventajas que presenta este sistema son:

- **Cambios innecesarios:** al alcanzarse la vida útil de un elemento se procede a su cambio, encontrándose muchas veces que el elemento que se cambia permitiría ser utilizado durante un tiempo más prolongado. En otros casos, ya con el equipo desmontado, se observa la necesidad de "aprovechar" para realizar el reemplazo de piezas menores en buen estado, cuyo coste es escaso frente al correspondiente de desmontaje y montaje, con el fin de prolongar la vida del conjunto. Estamos ante el caso de una *anticipación del reemplazo o cambio prematuro*.
- **Problemas iniciales de operación:** cuando se desmonta, se montan piezas nuevas, se monta y se efectúan las primeras pruebas de funcionamiento, pueden aparecer diferencias en la estabilidad, seguridad o regularidad de la marcha.
- **Coste en inventarios:** el coste en inventarios sigue siendo alto aunque previsible, lo cual permite una mejor gestión.
- **Mano de obra:** se necesitará contar con mano de obra intensiva y especial para períodos cortos, a efectos de liberar el equipo para el servicio lo más rápidamente posible.
- **Mantenimiento no efectuado:** si por alguna razón, no se realiza un servicio de mantenimiento previsto, se alteran los períodos de intervención y se produce un *degeneración* del servicio.

Por lo tanto, la planificación para la aplicación de este sistema consiste en:

- Definir qué partes o elementos serán objeto de este mantenimiento
- Establecer la vida útil de los mismos
- Determinar los trabajos a realizar en cada caso



- Agrupar los trabajos según época en que deberán efectuarse las intervenciones.

4.3. Mantenimiento predictivo

Es el conjunto de actividades de seguimiento y diagnóstico continuo (monitorización) de un sistema, que permiten una intervención correctora inmediata como consecuencia de la detección de algún síntoma de fallo.

El mantenimiento predictivo se basa en el hecho de que la mayoría de los fallos se producen lentamente y previamente, en algunos casos, arrojan indicios evidentes de un futuro fallo, bien a simple vista, o bien mediante la monitorización, es decir, mediante la elección, medición y de algunos parámetros relevantes que representen el buen funcionamiento del equipo analizado. Por ejemplo, estos parámetros pueden ser: la temperatura, la presión, la velocidad lineal, la velocidad angular, la resistencia eléctrica, los ruidos y vibraciones, la rigidez dieléctrica, la viscosidad, el contenido de humedad, de impurezas y de cenizas en aceites aislantes, el espesor de chapas, el nivel de un fluido, etc.

En otras palabras, con este método, tratamos de seguir la evolución de los futuros fallos.

Este sistema tiene la ventaja de que el seguimiento nos permite contar con un registro de la historia de la característica en análisis, sumamente útil ante fallos repetitivos; puede programarse la reparación en algunos casos, junto con la parada programada del equipo y existen menos intervenciones de la mano de obra en mantenimiento.

En el apartado 9 se abordarán con mucho mayor detalle las técnicas más comúnmente utilizadas en el mantenimiento predictivo.

4.4. Mantenimiento productivo total (Total Productive Maintenance TPM)

Este sistema está basado en la concepción japonesa del "Mantenimiento al primer nivel", en la que el propio usuario realiza pequeñas tareas de mantenimiento como: reglaje, inspección, sustitución de pequeñas cosas, etc., facilitando al jefe de mantenimiento la información necesaria para que luego las otras tareas se puedan hacer mejor y con mayor conocimiento de causa.

- Mantenimiento: Para mantener siempre las instalaciones en buen estado
- Productivo: Esta enfocado a aumentar la productividad
- Total: Implica a la totalidad del personal, (no solo al servicio de mantenimiento)

Este sistema coloca a todos los integrantes de la organización en la tarea de ejecutar un programa de mantenimiento preventivo, con el objetivo de maximizar la efectividad de los bienes.

Centra el programa en el factor humano de toda la compañía, para lo cual se asignan tareas de mantenimiento que deben ser realizadas en pequeños grupos, mediante una dirección motivadora.

5. CONCEPTOS ASOCIADOS AL MANTENIMIENTO. FIABILIDAD

La fiabilidad se define como la probabilidad de que un bien funcione adecuadamente durante un período determinado bajo condiciones operativas específicas (por ejemplo, condiciones de presión, temperatura, velocidad, tensión o forma de una onda eléctrica, nivel de vibraciones, etc.).

Se define la variable aleatoria T como la vida del bien o componente. Se supone que T tiene una función $F(t)$ de distribución acumulada expresada por:

$$F(t) = P(T \leq t)$$

Además existe la función $f(t)$ de densidad de probabilidades expresada por la ecuación:

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt}$$

La función de fiabilidad $R(t)$, también llamada función de supervivencia, se define como:

$$R(t) = P(T > t) = 1 - F(t)$$

En otras palabras, $R(t)$ es la probabilidad de que un componente nuevo sobreviva más del tiempo t . Por lo tanto, $F(t)$ es la probabilidad de que un componente nuevo no sobreviva más del tiempo t .

Por otra parte, la probabilidad de que un componente nuevo falle entre t y $t+s$ (s es un incremento de tiempo respecto a t) es igual a:

$$P\{t < T \leq t+s | T > t\} = \frac{P\{t < T \leq t+s\}}{P\{T > t\}} = \frac{F(t+s) - F(t)}{R(t)}$$

Dividiendo entre s y haciendo que s tienda a cero:

$$\lambda(t) = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{1}{s} \frac{F(t+s) - F(t)}{R(t)} = \frac{f(t)}{R(t)}$$



$\lambda(t)$ es la función de tasa de fallos o función de riesgo o tasa instantánea de fallos, y es una característica de fiabilidad del producto.

La función de tasa de fallas no tiene interpretación física directa, sin embargo, para valores suficientemente pequeños de t se puede definir como la probabilidad de fallo del componente en un tiempo infinitamente pequeño dt cuando en el instante t estaba operativo.

5.1 Evolución de la tasa de fallos a lo largo del tiempo. Curva de bañera

La duración de la vida de un equipo se puede dividir en tres periodos diferentes:

I.- Juventud. Zona de mortandad infantil.

El fallo se produce inmediatamente o al cabo de muy poco tiempo de la puesta en funcionamiento, como consecuencia de:

- Errores de diseño
- Defectos de fabricación o montaje
- Ajuste difícil, que es preciso revisar en las condiciones reales de funcionamiento hasta dar con la puesta a punto deseada.

II.- Madurez. Periodo de vida útil.

Periodo de vida útil en el que se producen fallos de carácter aleatorio. Es el periodo de mayor duración, en el que se suelen estudiar los sistemas, ya que se supone que se reemplazan antes de que alcancen el periodo de envejecimiento.

III.- Envejecimiento

Corresponde al agotamiento, al cabo de un cierto tiempo, de algún elemento que se consume o deteriora constantemente durante el funcionamiento.

Estos tres periodos se distinguen con claridad en un gráfico en el que se represente la tasa de fallos del sistema frente al tiempo. Este gráfico se denomina "Curva de bañera".

Aunque existen hasta seis tipos diferentes de curva de bañera, dependiendo del tipo de componente del que se trate, una curva de bañera convencional se adapta a la siguiente figura:

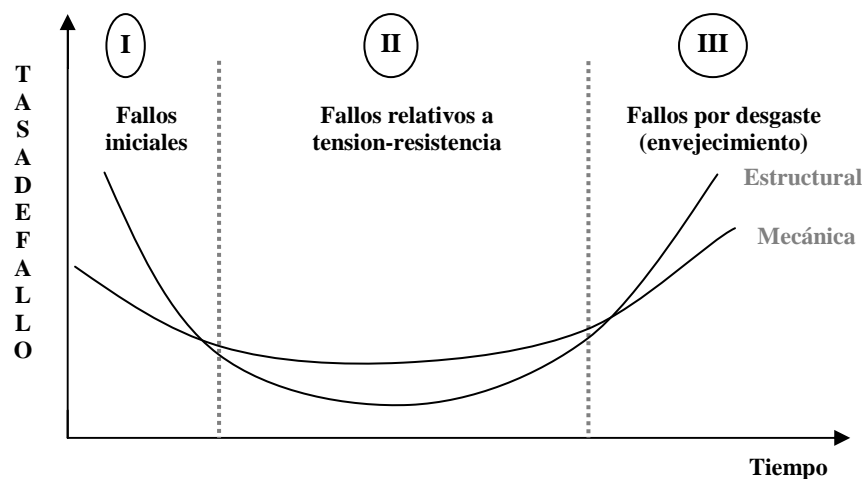


Figura 1. Curva de "bañera"

En una curva de la bañera de tipo convencional se aprecian las tres zonas descritas anteriormente:

i. Zona de mortandad infantil: Las averías van disminuyendo con el tiempo, hasta tomar un valor constante y llegar a la vida -útil. En esta zona fallan los componentes con defectos de fabricación, por lo que la tasa de averías disminuye con el tiempo. Los fabricantes, para evitar esta zona, someten a sus componentes a un "quemado" inicial ("burn-in" en inglés), desechando los componentes defectuosos. Este quemado inicial se realiza sometiendo a los componentes a determinadas condiciones extremas, que aceleran los mecanismos de fallo. Los componentes que pasan este periodo son los que nos venden los fabricantes, ya en la zona de vida útil.

ii. Zona de vida útil, con tasa de fallos aproximadamente constante. Es la zona de mayor duración, en la que se suelen estudiar los sistemas, ya que se supone que se reemplazan antes de que alcancen la zona de envejecimiento.

iii. Zona de envejecimiento: La que la tasa de averías vuelve a crecer, debido a que los componentes fallan por degradación de sus características por el transcurso de tiempo. Aún con reparaciones y mantenimiento, las tasas de fallos aumentan, hasta que resulta demasiado costoso el mantenimiento.

5.2 Tiempo medio entre fallos (MTBF)

En la práctica, la fiabilidad se mide como el tiempo medio entre ciclos de mantenimiento o el tiempo medio entre dos fallos consecutivos (*Mean Time Between Failures; MTBF*).

Por ejemplo si disponemos de un producto de N componentes operando durante un periodo de tiempo T , y suponemos que en este periodo han fallado varios componentes (algunos en varias ocasiones), para este caso el componente i -ésimo habrá tenido n_i averías, luego el número medio de averías para el producto será:

$$\bar{n} = \sum_{i=0}^N \frac{n_i}{N}$$

Siendo el MTBF el cociente entre T y \bar{n} , es decir:

$$MTBF = \frac{T}{\bar{n}}$$

5.3 Tiempo medio hasta la avería (MTTF)

El tiempo medio hasta la avería (*Mean Time To Failure; MTTF*), es otro de los parámetros utilizados, junto con la tasa de fallos $\lambda(t)$ para especificar la calidad de un componente o de un sistema.

Por ejemplo si se ensayan N elementos idénticos desde el instante $t=0$, y se miden los tiempos de funcionamiento de cada uno hasta que se produzca alguna avería. Entonces el MTTF será la media de los tiempos t_i medidos, es decir:

$$MTTF = \frac{\sum_{i=1}^N t_i}{N}$$

5.4 Modelos matemáticos de distribución de probabilidad de fallos

5.4.1. Ley exponencial de fallos. Tasa de fallos constante.

La distribución exponencial juega un papel fundamental en la teoría y la práctica de la fiabilidad, porque describe con exactitud las características de fallo de muchos equipos en funcionamiento.

En el caso de que la tasa de fallos sea constante, su expresión es:

$$\lambda(t) = \lambda$$

La probabilidad de que una unidad que está trabajando falle en el próximo instante es independiente de cuánto tiempo ha estado trabajando. Esto implica que la unidad no presenta síntomas de envejecimiento. Es igualmente probable que falle en el instante siguiente, cuando está nueva o cuando no lo está.

En este caso, la función de fiabilidad correspondiente se puede escribir como:

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

Por lo tanto, la función de distribución $F(t)$ se expresa:

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

y la función de densidad $f(t)$:

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

5.4.2. Ley Weibull. Tasas de fallos crecientes y decrecientes.

Una gran mayoría de los equipos reales no tienen una tasa de fallos constante, sino que es más probable que fallen a medida que envejecen. En este caso la tasa de fallos es creciente.

Por otra parte, también nos podemos encontrar con bienes que posean tasas de fallos decrecientes.

La función para tasas de fallos crecientes o decrecientes tienen la forma:

$$\lambda(t) = \alpha \beta t^{\beta-1}, \text{ siendo } \alpha \text{ y } \beta > 0$$

En este caso, $\lambda(t)$ es una función polinomial en la variable t , que depende de los dos parámetros α y β .

Cuando $\beta > 1$, $\lambda(t)$ es creciente.

Cuando $0 < \beta < 1$, $\lambda(t)$ es decreciente

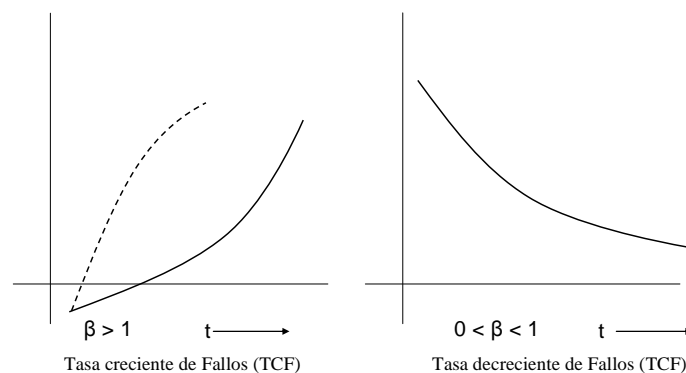


Figura 2. Funciones de tasas de fallos para la distribución de Weibull del tiempo de vida

Esta forma de $\lambda(t)$ da como resultado una expresión para la función de fiabilidad $R(t)$:

$$R(t) = e^{-\alpha t} \beta \text{ para toda } t \geq 0$$

es decir:

$$F(t) = 1 - e^{-\alpha t} \beta \text{ para toda } t \geq 0$$

Con frecuencia se cumple que las funciones empíricas de frecuencia de fallo se aproximan mucho a la descrita mediante la distribución de Weibull.

Cuando $\beta = 1$ la distribución de Weibull es igual a la exponencial.

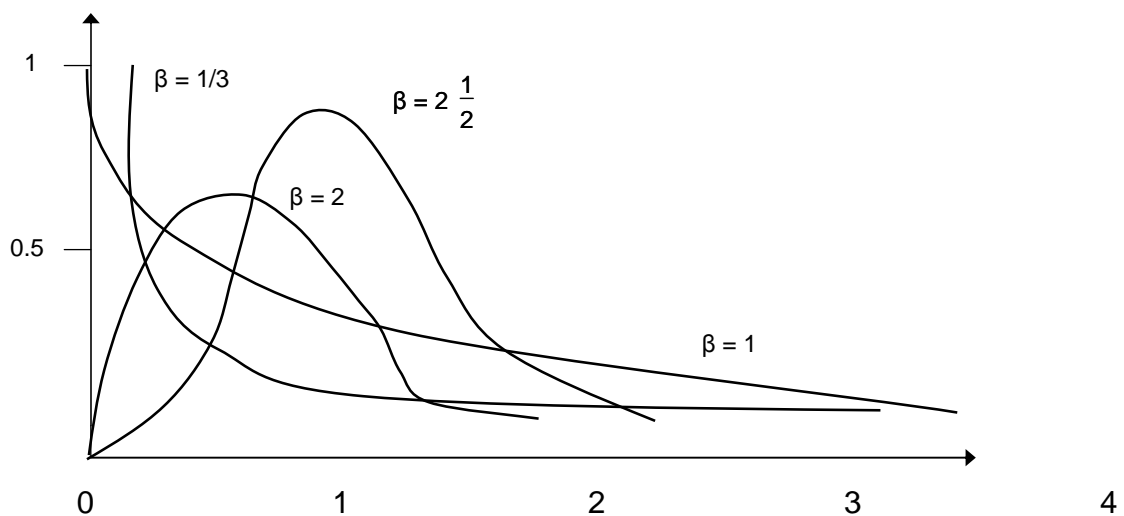


Figura 3. Densidades de Weibull para distintos valores de β

5.5 Fiabilidad de sistemas

El problema básico de la fiabilidad de sistemas consiste en el cálculo de la fiabilidad $R(t)$, a partir de las fiabilidades $R_1(t)$, $R_2(t)$, \dots , $R_n(t)$ de sus componentes.

A continuación se desarrollan las configuraciones básicas más usuales con la que se suelen encontrar distribuidos los componentes en un sistema:

- **Sistemas en serie**

Se denomina sistema en serie a aquél por el cual el fallo del sistema equivale al de un sólo componente, es decir, el sistema funciona si, todos los componentes funcionan correctamente.

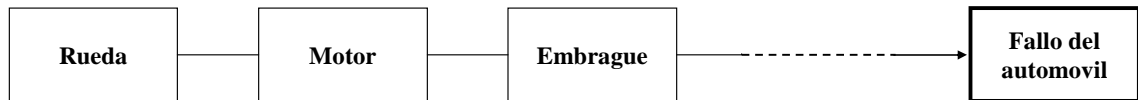


Figura 4. Ejemplo clásico de un sistema en serie. Caso sencillo de un automóvil

Para "n" componentes en serie la fiabilidad del sistema será:

$$R(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t)$$

En una configuración en serie, la fiabilidad se puede aumentar mediante:

- Reducción del número de componentes.
- Elección de componentes con una tasa de fallos baja, o lo que es lo mismo, con una fiabilidad elevada.
- Aplicación a los componentes de unos esfuerzos adecuados

• Sistemas en paralelo

Un sistema en paralelo se caracteriza porque el sistema falla si todos los componentes fallan en su operación. Siendo la probabilidad de que se presente este evento el producto de probabilidades de los eventos componentes, se deriva que no su fiabilidad es el producto de las no fiabilidades de sus n componentes, o sea:

$$F(t) = F_1(t) \cdot F_2(t) \cdot \dots \cdot F_n(t)$$

Y de aquí resulta:

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

Luego la fiabilidad del sistema es:

$$R(t) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i(t))$$

De esta expresión se deducen una gran cantidad de casos particulares.

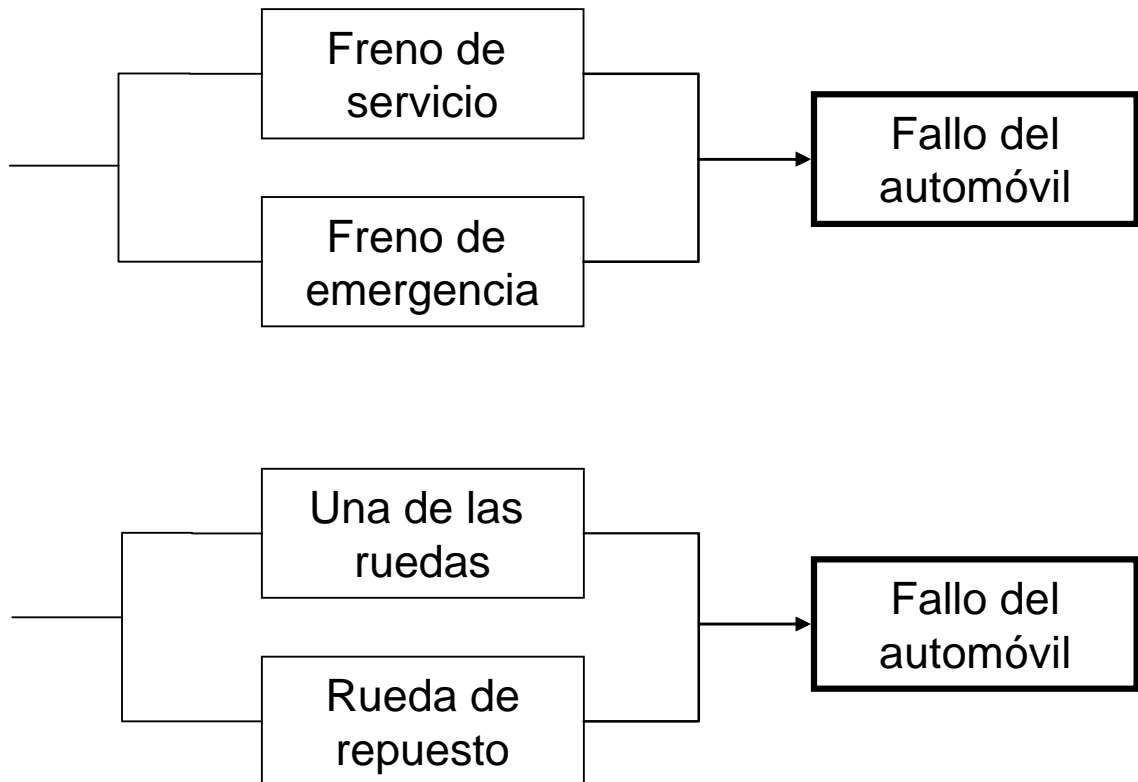


Figura 5. Ejemplo de sistema en paralelo. Fallo en el automóvil

La característica inherente al modelo paralelo se llama redundancia: Es decir existe más de un componente para desempeñar una función dada. La redundancia puede ser de dos clases:

- **Redundancia activa.**- En este caso, todos los elementos redundantes están activos simultáneamente durante la misión.
- **Redundancia secuencial (llamada también stand-by o pasiva).**- En esta ocasión, el elemento redundante sólo entra en juego cuando se le da la orden como consecuencia del fallo del elemento primario. Hasta que llega ese momento el elemento redundante ha permanecido inactivo, en reserva, pero ha podido estar:
 - Totalmente inactivo (Ejem.: La rueda de repuesto de un automóvil)
 - Energizado total o parcialmente (Ejem.: Un grupo electrógeno).

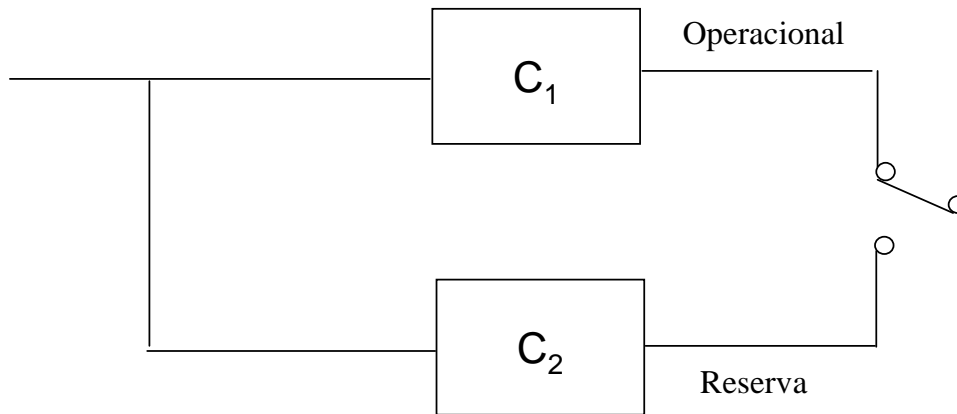


Figura 6. Ejemplo de un sistema redundante en espera

La fiabilidad de un sistema en reserva formado por dos componentes (el operacional y el de reserva) como se muestra en la Figura 6 es la probabilidad de que la unidad operacional funcione correctamente durante el tiempo t , o bien de que habiendo fallado en el tiempo t_1 , la unidad en reserva no falle al entrar en funcionamiento y continúe operando con éxito hasta que haya transcurrido el tiempo que hay entre t_1 y t . De ese modo la fiabilidad $R(t)$ del sistema será:

$$R(t) = R_1(t) + F(t_1) \cdot R_2(t-t_1)$$

Donde:

$R_1(t)$: Fiabilidad de la unidad operacional en el tiempo t .

$F(t_1)$: Probabilidad de fallo de la unidad operacional en el tiempo t_1 .

$R_2(t - t_1)$: Probabilidad de fallo de la unidad de reserva en el tiempo $t - t_1$

6. CONCEPTOS ASOCIADOS AL MANTENIMIENTO. MANTENIBILIDAD

La mantenibilidad es una característica inherente a un elemento, asociada a su capacidad de ser recuperado para el servicio cuando se realiza la tarea de mantenimiento necesaria según se especifica.

Así, la mantenibilidad podría ser expresada cuantitativamente, mediante el tiempo T empleado en realizar la tarea de mantenimiento especificada en el elemento que se considera, con los recursos de apoyo especificados. Intervienen en la ejecución de estas tareas tres factores:

- Factores personales: Habilidad, motivación, experiencia, capacidad física, etc.



- Factores condicionales: Representan la influencia del entorno operativo y las consecuencias que ha producido el fallo en la condición física, geometría y forma del elemento en recuperación.
- El entorno: Temperatura, humedad, ruido, iluminación, vibración, momento del día, viento, etc.

Consecuentemente, la naturaleza del parámetro T para la tarea de mantenimiento también depende de la variabilidad de estos parámetros.

$$T = f(\text{factores personales, condicionales y ambientales})$$

Ante esta situación, el único camino posible en el análisis de mantenibilidad es recurrir a la teoría de probabilidades.

Existe cierto paralelismo entre el estudio estadístico de la fiabilidad y el de la mantenibilidad.

- La variable aleatoria en el tiempo es “la duración de la intervención”
- La densidad de probabilidad del tiempo de reparación se llama $g(t)$
- La función Mantenibilidad $M(t)$ es la probabilidad de reparación de una duración $T < t$

$$M(t) = P(T < t)$$

$\mu(t)$ es la función de tasa de reparación y es igual a:

$$\mu(t) = \frac{g(t)}{1 - M(t)}$$

6.1 Media de los tiempos técnicos de reparación (MTTR)

En la práctica la tasa de reparación se puede medir a través de la Media de los tiempos técnicos de reparación (Mean Time To Repair MTTR).

7. CONCEPTOS ASOCIADOS AL MANTENIMIENTO. DISPONIBILIDAD

La disponibilidad es la probabilidad de un sistema de estar en funcionamiento o listo para funcionar en el momento o instante que es requerido.

Para poder disponer de un sistema en cualquier instante, éste no debe de tener fallos, o bien, en caso de haberlos sufrido, debe haber sido reparado en un tiempo menor que el máximo permitido para su mantenimiento.

Suponiendo que la tasa de fallos y la tasa de reparación son constantes:

- Tasa de fallos = λ (t) = λ
- Tasa de reparación = μ (t) = μ

Entonces:

MTBF = $1 / \lambda$ (Tiempo medio entre fallos)

MTTR = $1 / \mu$ (Tiempo medio de reparación)

A (Availability): Disponibilidad del sistema

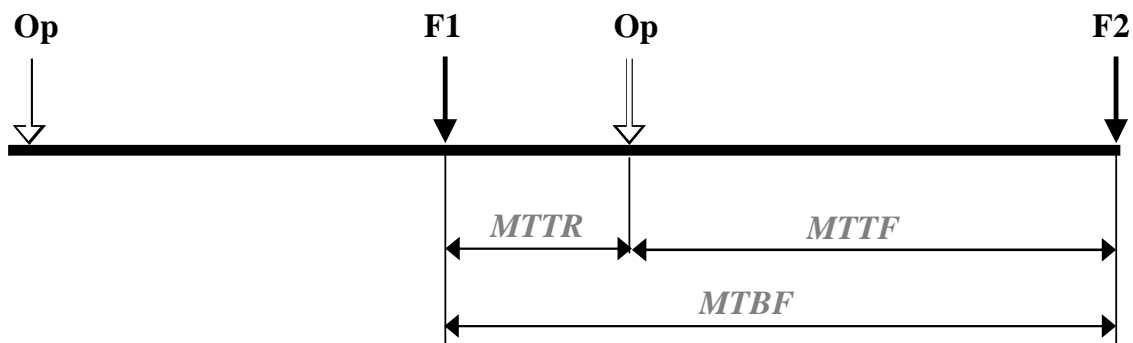


Figura 7. Relación entre el tiempo medio de reparación (MTTR), tiempo medio hasta la avería (MTTF) y tiempo medio de reparación (MTBF)

En la Figura 7 se muestra un ciclo de operación, "Op" indica el instante en que el elemento, producto o sistema comienza a estar operativo. F1 y F2 muestran los instantes en que se producen los fallos 1 y 2 respectivamente.

Luego, de acuerdo a la Figura 7 podemos expresar la disponibilidad (A) así:

$$A = \frac{\textit{T tiempo total en condiciones de servicio}}{\textit{T tiempo total del intervalo estudiado}}$$

$$A = \frac{K \cdot MTBF}{K \cdot (MTBF + MTTR)} = \frac{\frac{1}{\lambda}}{\frac{1}{\lambda} + \frac{1}{\mu}} = \frac{\mu}{\mu + \lambda}$$

K: Representa el número de ciclos-reparación.

Como se ve en la expresión anterior, se tendría una disponibilidad del 100% ante un fallo si el MTTR=0, es decir que no se tardase casi nada en reparar un fallo, lo cual no se cumple (sería ideal), pero se aspira a ello. Tanto la fiabilidad como la mantenibilidad estudiadas anteriormente, son determinantes de la disponibilidad.

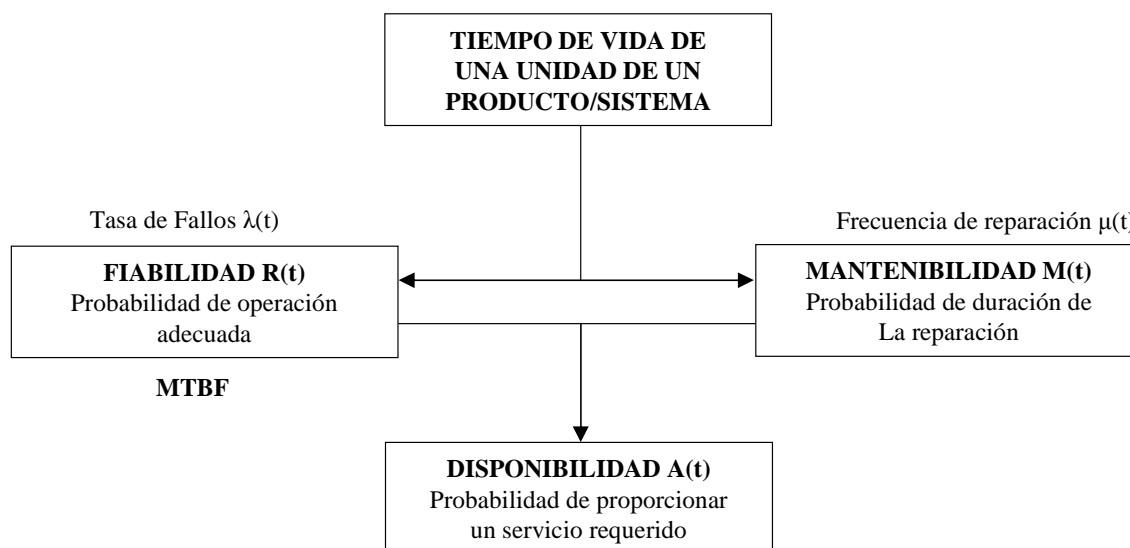


Figura 8. Relación entre disponibilidad, mantenibilidad y fiabilidad

La disponibilidad del producto durante un periodo de utilización prefijado, llamada calidad de funcionamiento, está en función de la fiabilidad y de la mantenibilidad del mismo.

Actualmente, es política común de los ingenieros de diseño, incluir en el DISEÑO DEL PRODUCTO innovaciones constantes que generen un aumento tanto de la fiabilidad como de la mantenibilidad, con la finalidad de generar ahorros para los futuros Costes de Post-Venta (como en el servicio de mantenimiento).

8. PLANIFICACIÓN DEL MANTENIMIENTO INDUSTRIAL

8.1 Introducción

Una planta compleja puede ser dividida, atendiendo a su funcionalidad, en tres niveles distintos. La delegación de responsabilidad para las decisiones de reparación o sustitución de un nivel en particular es distinta entre plantas, pero los gestores de más alto nivel son los responsables de las decisiones sobre la sustitución de unidades y los gestores de mantenimiento son los responsables de la sustitución o reparación de los equipos y sus componentes.

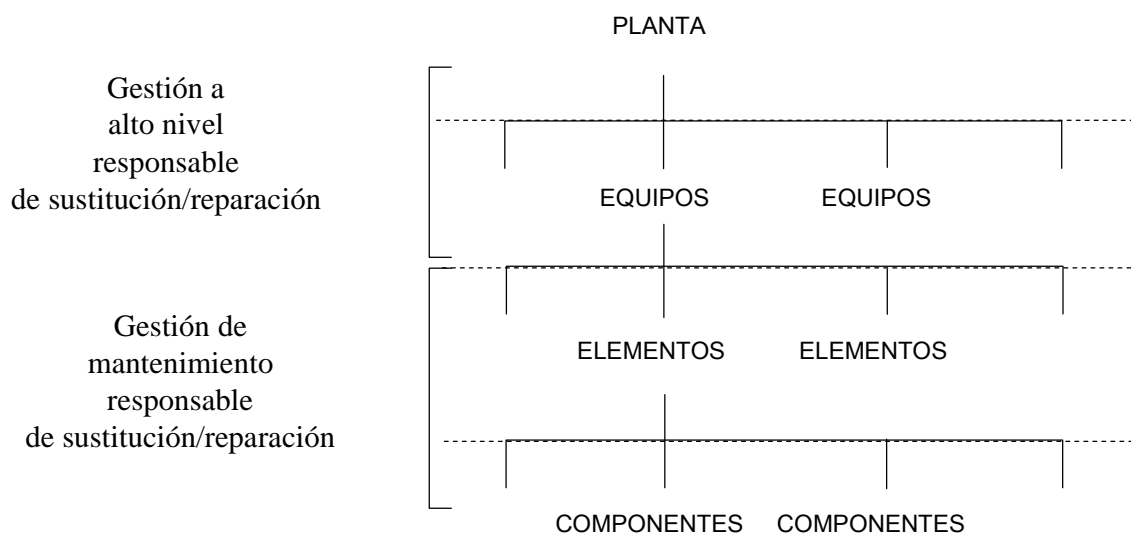


Figura 9. Relación entre la estructura de la planta y la cadena de toma de decisión

Esta división de responsabilidad es obligada dado que la estrategia de sustitución de los equipos se ve influida tanto por factores externos (la mayoría a largo plazo), tales como obsolescencia, ventas y coste del capital, como por factores internos (la mayoría a corto plazo), como el coste de mantenimiento y el coste de operación.

En consecuencia, la sustitución de unidades se puede considerar como parte de la estrategia corporativa. Sin embargo, se necesita un plan de mantenimiento, a menor plazo, para el mantenimiento de las unidades, mediante la adopción de las políticas de mantenimiento apropiadas (P. ej., reparación, sustitución, modificación, etc.) para los equipos y componentes.

Estrategia y plan están interrelacionados ya que el coste de mantenimiento influye sobre la sustitución de la unidad, la cual, a su vez, influye en el plan de mantenimiento.

El plan de mantenimiento debería establecer unas bases racionales para poder formular un programa de mantenimiento preventivo y debería asimismo estipular las líneas maestras del mantenimiento correctivo.

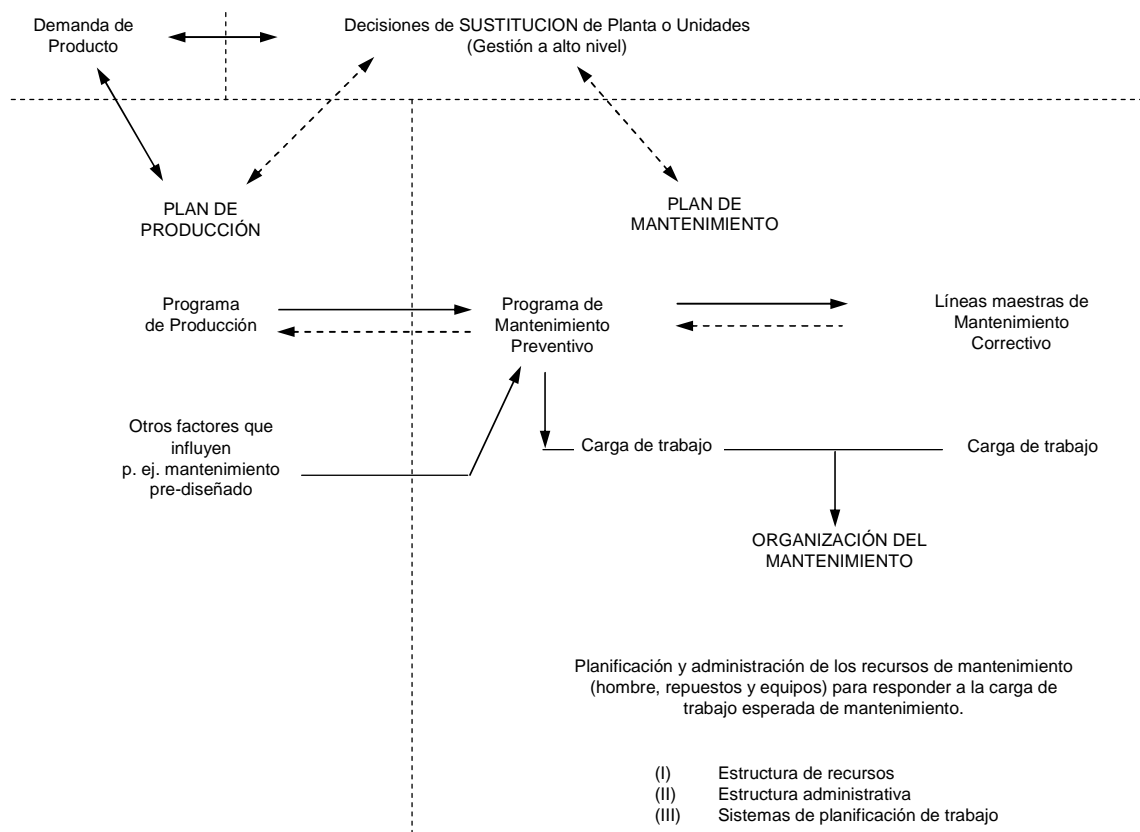


Figura 10. Aproximación sistemática para la formulación de un plan de mantenimiento

8.2 Políticas de Mantenimiento: Preventivo y Correctivo

Para cada equipo de una planta pueden formularse varias políticas de mantenimiento, individualmente o en combinación. La suma racional de tales políticas especificadas, para el total de la planta, constituye el plan de mantenimiento.

Las acciones que pueden llevarse a cabo antes de producirse el fallo serán preventivas. Las que se lleven a cabo después, correctivas.

Debido a que, por definición, las acciones de mantenimiento preventivo son determinísticas, pueden ser programadas y realizadas generalmente por separado, según un programa de mantenimiento preventivo.

Debido a la naturaleza probabilística del fallo, y la incertidumbre que rodea a la toma de decisiones en mantenimiento correctivo, éste no puede ser programado. Sin embargo, para unidades críticas resulta esencial que las líneas maestras del mantenimiento correctivo están formuladas para poder llevar a cabo la toma de decisiones después del fallo.

Para poder planificar el mantenimiento es necesario conocer las diferentes políticas de trabajo que se pueden seguir para realizar dicho mantenimiento:



8.2.1. Reparación o sustitución a intervalo fijo antes del fallo

Esta política será efectiva sólo cuando el modelo de fallo del elemento dependa claramente del tiempo, esperándose que el elemento se agote en el intervalo de vida de la unidad y cuando los costes totales (directos e indirectos) de su sustitución sean mucho menores que los de fallo y reparación. Es decir, cuando el elemento pueda ser clasificado como de fácil sustitución.

Esta política no es apropiada para equipos de difícil sustitución porque:

- Cuanto más complicado sea el elemento, menor posibilidad habrá de que su patrón de fallo dependa claramente del tiempo.
- Los elementos complejos son caros de sustituir o reparar y además muestran posteriores problemas de “mantenimiento por manipulación”.

8.2.2. Mantenimiento según condición

El momento oportuno para llevar a cabo el mantenimiento correctivo se debe determinar monitorizando alguna condición, aunque no siempre es fácil encontrar un parámetro fácilmente monitorizable que muestre el deterioro del equipo.

En el caso de que sí se pueda, se reduce, o incluso se elimina, el factor probabilístico en la predicción del fallo, maximizándose la vida del elemento y minimizándose las consecuencias del fallo. Sin embargo, el mantenimiento basado en el estado o condición puede ser costoso e tiempo e instrumentación.

La conveniencia de esta política y su periodicidad dependerá de las características de deterioro del equipo estudiado y de los costes que éste implica.

En el extremo más simple, los equipos de fácil sustitución, como puede ser una pastilla de freno, pueden comprobarse a intervalos cortos y con poco coste. En el extremo contrario, los equipos de difícil sustitución, por ejemplo, un motor, pueden requerir un desmontaje completo para su inspección visual, pero con este tipo de equipos se pueden utilizar técnicas de monitorización de vibraciones, pulsos de choque, análisis de aceite, termografías. El alto coste de instrumentación se justificará por los elevados costes de reparación o por las pérdidas de indisponibilidad.

8.2.3. Mantenimiento de oportunidad

Este término se aplica a acciones de mantenimiento realizadas después del fallo o durante reparaciones realizadas a intervalo fijo o según el estado, pero en otros elementos de aquéllos que eran la causa principal de su reparación.

Esta política es la más apropiada para los elementos de difícil sustitución o en funcionamiento continuo, con altos costes de parada y/o de indisponibilidad.

8.2.4. Operación hasta fallo y mantenimiento correctivo

El mantenimiento correctivo no sólo aparece cuando un elemento falla, sino también cuando es indicado por criterio basado en la condición. La tarea básica es establecer la forma más económica de restaurar la unidad a un estado aceptable. Por ejemplo, para el fallo de un elemento de difícil sustitución las alternativas pueden ser las siguientes:

- *Reparación in-situ*: Desmontaje en el punto de operación y sustitución de los componentes defectuosos. Esto puede llevar a indisponibilidad de la unidad o de la planta.
- *Sustitución del elemento completo*: Por otro nuevo o reacondicionado. Esto minimiza la indisponibilidad. El elemento retirado puede ser reparado, reacondicionado o desechado en las instalaciones de mantenimiento.

Muchos son los factores que influyen en la elección reparación-sustitución. Los más importantes son el coste de indisponibilidad, el tiempo de reparación comparado con el de sustitución, la disponibilidad y el coste de los recursos. Todos estos factores están en continuo cambio, y esto, junto con las múltiples causas posibles de defecto y las múltiples posibilidades de reparación, hacen que el plan de mantenimiento correctivo sólo pueda proporcionar una guía para ayudar a la toma de decisión.

8.2.5. Mantenimiento modificativo

En contraste con las políticas anteriores, cuyo objetivo es minimizar los defectos del fallo, el mantenimiento modificativo intenta eliminar la causa del fallo. Claramente, esto implica una acción de ingeniería en vez de mantenimiento. pero habitualmente es responsabilidad del departamento de mantenimiento.

Es una política habitual en áreas de alto coste de mantenimiento que existen debido a su mal diseño o porque el equipamiento está siendo utilizado fuera de sus especificaciones de diseño.

8.3 Plan de Mantenimiento

El plan de mantenimiento de una planta deberá elaborarse a partir de la selección de la mejor combinación de las políticas enumeradas para cada elemento, coordinándolas para conseguir el uso óptimo de los recursos y el tiempo.

Idealmente, las acciones preventivas y correctivas para cada unidad de la planta deberían estar especificadas con cierto detalle por los fabricantes. Esto raramente se da en los equipo de difícil sustitución en los que el mantenimiento es caro y probabilista.



La gran cantidad de factores que influyen en la selección de la política de mantenimiento, hacen que sea necesario un procedimiento sistemático para determinar el mejor programa de mantenimiento para cada periodo de tiempo. Las etapas de este procedimiento se explican a continuación:

8.3.1. Clasificación e identificación de los equipos

Esta etapa es importante, pero habitualmente tediosa y difícil debido al volumen del trabajo y a la complejidad y tamaño de los equipos. Una buena clasificación de los equipos es la que se basa en su reemplazabilidad y función. El sistema de identificación más simple es el que se basa en la codificación numérica.

8.3.2. Recogida de información

La recogida de información que pueda ser relevante para la planificación del mantenimiento es esencial para todos los equipos de la planta. Debido a que el mantenimiento es inseparable de la producción es inevitable que la información más relevante sea: Modelo de producción (funcionamiento continuo, fluctuante o intermitente) y la naturaleza del proceso.

Una vez obtenida la información será posible elaborar un programa para cada equipo y para cada periodo considerado, del tiempo estimado disponible para mantenimiento que no conlleve pérdida de producción.

Otras informaciones (la mayoría de las cuales pueden ser proporcionadas por el fabricante) que pueden ser necesarias para cada elemento son:

- *Recomendaciones de mantenimiento de los fabricantes:* Acciones, periodicidades, etc.
- *Factores de equipamiento (que ayuden a estimar la carga de trabajo de mantenimiento):*
 - Características de fallo: tiempo medio a fallo, modo de fallo.
 - Características de reparación: Tiempo medio de reparación, tiempo tras el fallo antes de que la planta se vea afectada, nivel de redundancia.
- Factores económicos (que ayuden a la predicción de las principales unidades críticas: Consecuencias del fallo, coste de sustitución antes del fallo, coste de material del equipo, coste de monitorización.
- Factores de seguridad (que imponen restricciones a la decisión): Internos, medio ambientales, legislación y reglamentos.



8.3.3. Selección de la política

La mejor política para cada equipo puede ser determinada, primero, identificando las políticas que sean efectivas y, después, decidiendo cuál es la más deseable. La elección dependerá de muchos factores y el criterio de decisión normalmente será el de coste mínimo, probado que se cumplan los criterios de seguridad, legales y otros.

- Equipos de fácil sustitución: El fabricante suele recomendar un programa detallado de acciones, periodicidades y recursos necesarios. El problema será normalmente, hacer la mejor programación del gran número de diferentes acciones (para la totalidad de la planta) para poder coordinar los recursos y ajustarlos a los tiempos de parada previstos.
- Equipos de difícil sustitución: Los factores principales de equipamiento, seguridad y coste pueden ser clasificados en orden de importancia, y normalmente eso será todo lo necesario para seleccionar la mejor política de mantenimiento.
- Equipos no sustituibles: Debido a que no se esperan que fallen, se deben asumir que no necesitan ninguna acción concreta. Sin embargo, en el caso anómalo de que falle, dicho fallo deberá ser registrado, analizado, y cuando sea necesario se identificará la política de mantenimiento apropiada o la modificación de su diseño.

Resumiendo:

- La política de sustituciones a intervalo fijo es normalmente la más útil para los equipos de fácil sustitución, de bajo coste.
- La política de mantenimiento basado en condición es normalmente la más útil para los equipos de difícil sustitución, de alto coste.
- En todos los equipos que tengan alto coste de mantenimiento, sustituibles o no, deberá considerarse la modificación de su diseño.
- Cuando no sea efectiva, o deseable, ninguna acción de mantenimiento preventivo o modificativo, el equipo se operará hasta su fallo.

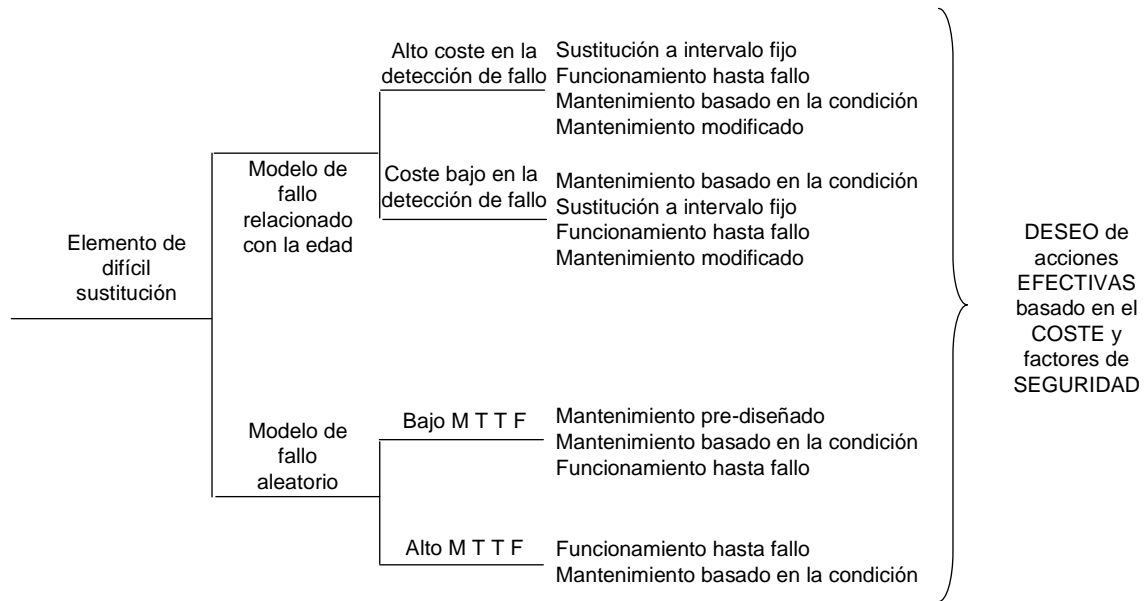


Figura 11. Selección de las políticas de mantenimiento para ítems de planta complejos

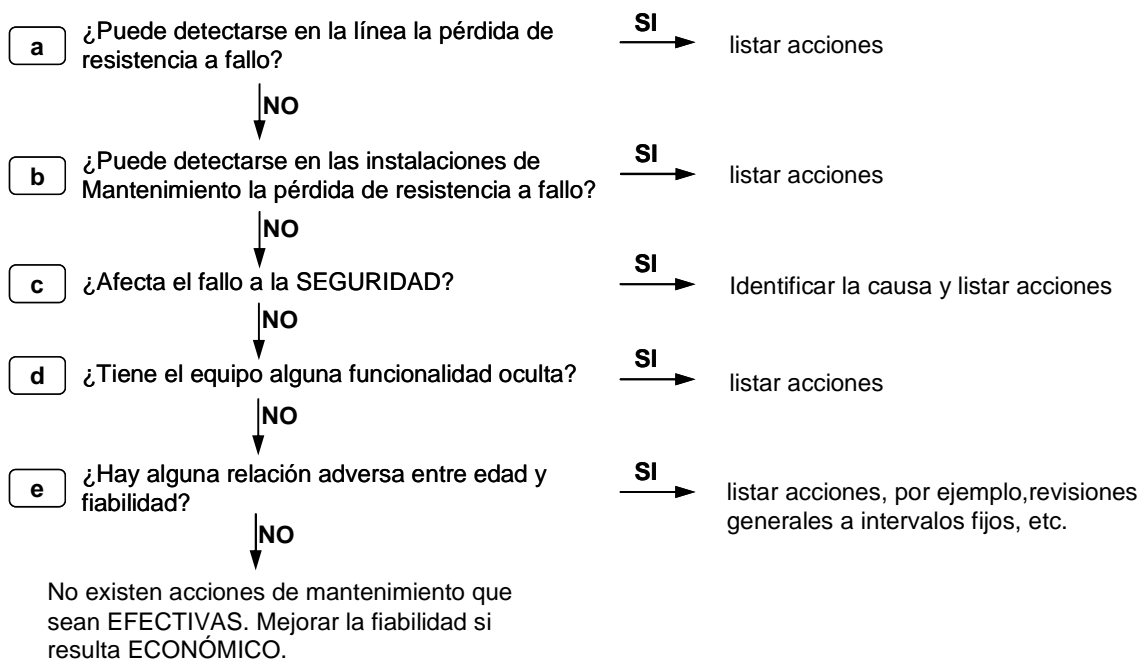


Figura 12. Diagrama de toma de decisión – valoración de la potencial efectividad de las acciones de mantenimiento

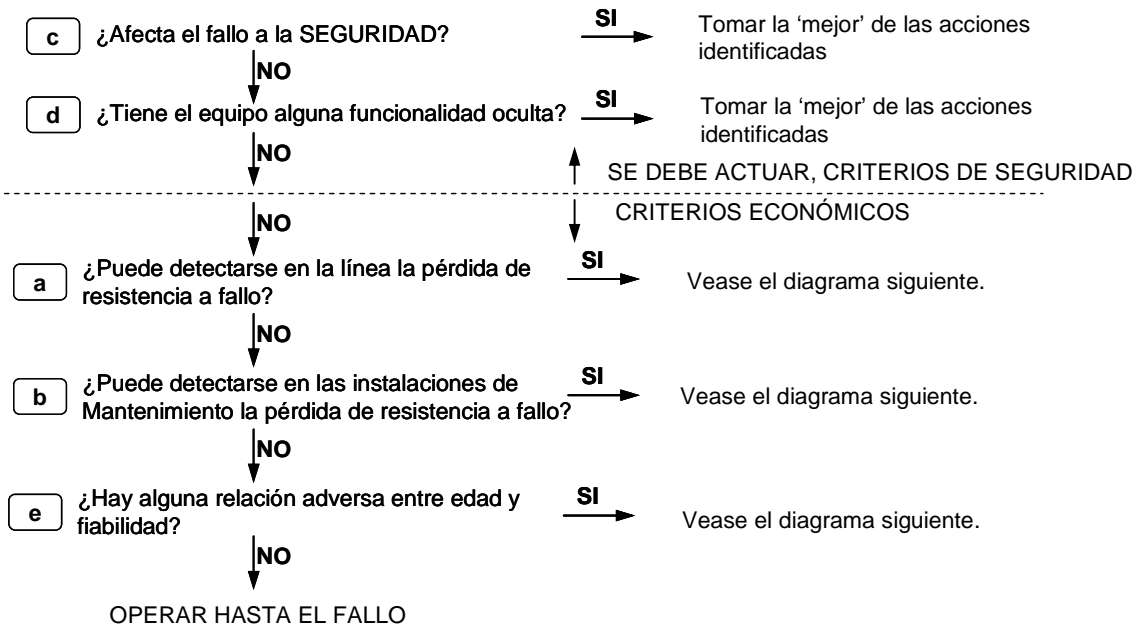


Figura 13. Diagrama de toma de decisión – valoración de la necesidad de las políticas de mantenimiento identificadas como efectivas

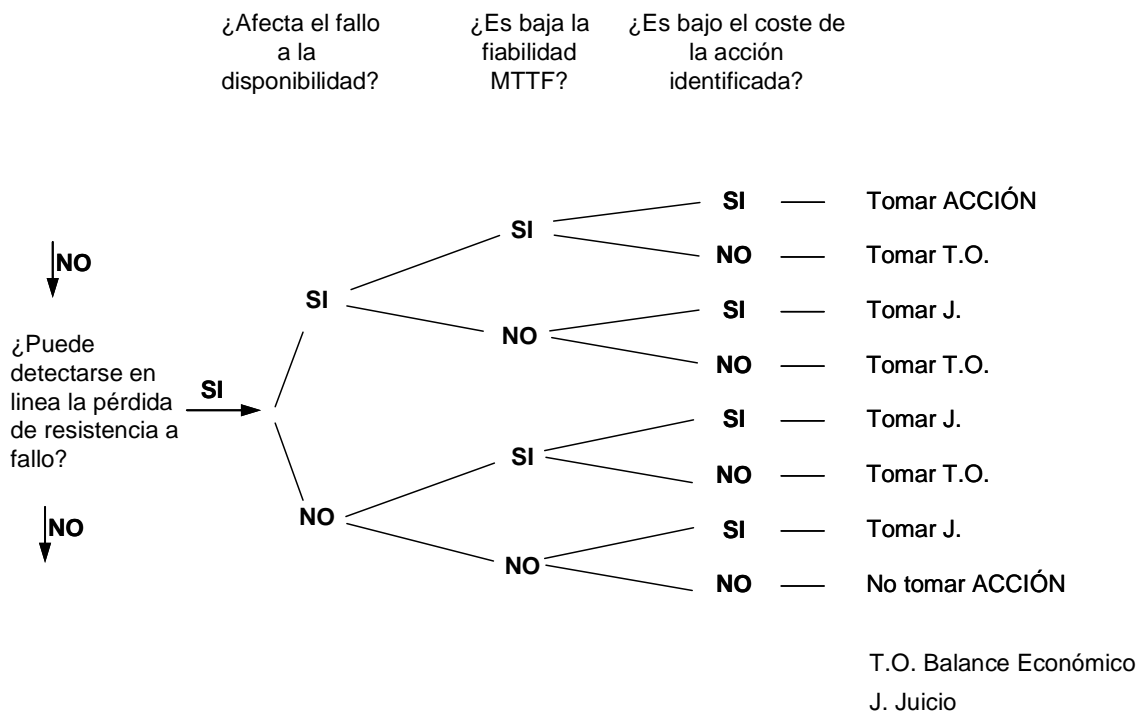


Figura 14. Diagrama de toma de decisión – determinación de la mejor política

8.3.4. Programa de Mantenimiento Preventivo

Cuando los análisis individuales estén terminados, entonces se examinarán las acciones relacionadas y las periodicidades en conjunto, con el objeto de encontrar oportunidades de



coordinación (mediante la programación conjunta, en periodos fijos, de todas las acciones a realizar sobre un grupo de equipos o en una unidad).

Esto llevará a un compromiso entre los programas individuales óptimos, el uso más económico de la mano de obra y la máxima disponibilidad de la planta.

Estos periodos predeterminados deberán tener una tolerancia en tiempo para admitir contingencias tales como la incertidumbre en la planificación de producción.

De este análisis resultan los programas de inspección, de lubricación, de otros servicios y de las revisiones generales.

8.3.5. Programa de Mantenimiento Correctivo

Cuando la planta es nueva, incluso después de haber realizado los análisis mencionados con anterioridad, resulta difícil predecir el nivel y la naturaleza de la carga de mantenimiento correctivo. Durante la vida inicial de la planta la predicción es muy imprecisa y dependerá fundamentalmente de la información proporcionada por los fabricantes y de la experiencia de los ingenieros de planta.

Obviamente, esta predicción mejorará con la vida de la planta y, en consecuencia, la carga de mantenimiento correctivo podrá ser planificada con mayor precisión.

La decisión crítica a este respecto es fijar el nivel de repuestos en existencias. Cuanto más se tengan, menor será el coste de indisponibilidad en caso de fallo, y además será más fácil organizar el mantenimiento correctivo; pero por otro lado, los costes de inmovilizado serán cada vez mayores.

El problema del gestor de mantenimiento es minimizar la suma de estos costes, para lo que es esencial identificar las unidades o los equipos críticos en la planta y asegurarse de que se adopta el mejor plan de mantenimiento correctivo.

9. MANTENIMIENTO SEGÚN CONDICIÓN O ESTADO

El mantenimiento realizado en base al deterioro significativo de un equipo, señalado por la variación de un parámetro controlado e indicativo del funcionamiento o rendimiento de dicho equipo, se denomina "Mantenimiento según condición o estado", también llamado "Mantenimiento Predictivo".

El mantenimiento según condición difiere del mantenimiento por avería (correctivo) y del realizado a plazo fijo en que requiere el control de algún parámetro indicativo del funcionamiento del equipo a mantener.

En general, el mantenimiento según condición será más eficiente y flexible que cualquiera de los otros tipos de mantenimiento. Cuando haya indicación de deterioro se puede programar



la parada del equipo con anterioridad al fallo. Por otra parte, se puede reducir la cantidad de piezas sustituidas innecesariamente con carácter preventivo; mientras que si las consecuencias del fallo son catastróficas, la condición o parámetro controlado puede ser empleado para indicar un posible fallo inminente antes de que la probabilidad del mismo sea significativa.

Existen dos razones fundamentales para, en ciertas circunstancias, no aplicar el mantenimiento según condición. Primera, no todas las causas de fallo de la planta pueden ser detectadas con antelación. Si la causa más probable de fallo de una unidad cae en esta categoría la monitorización de condiciones será de poco valor. Segunda, el control de condición es por su propia naturaleza, costoso en mano de obra, o en equipos, o en ambos.

Únicamente si el coste de monitorización es inferior a la reducción esperada en los costes de la mano de obra de mantenimiento y de la indisponibilidad, o si la seguridad personal es un hecho relevante, es beneficioso aplicar el mantenimiento según condición.

9.1 Tipos de control o condición de estado

El control de condición o estado se divide en dos clases:

- Control que puede llevarse a cabo sin interrupción de la operación del equipo
- Control que requiere la parada del equipo, o al menos alejarse de sus condiciones normales de funcionamiento

9.2 Métodos de control o condición de estado

La mayoría de las técnicas de control de condición o estado suponen la aplicación sistemática de los métodos comúnmente aceptados de diagnóstico de fallos. El número de métodos aplicados es muy amplio. Ciertos métodos tienden a ser asociados con determinadas plantas o industrias en particular. A continuación se detallan los métodos más comunes.

9.2.1. Técnicas de control en marcha

- **Inspección visual, acústica y al tacto de los componentes accesibles**

La holgura de los componentes accesibles no rotativos se detecta rápidamente. Los restos de material por desgaste o corrosión, procedentes de las juntas de fricción tales como las uniones atornilladas, remachadas o embutidas, son un claro síntoma de holgura.

Un desplazamiento relativo tan pequeño como 1 :m en la interfase entre dos componentes puede percibirse por el tacto de los dedos.



Se puede aplicar una laca frágil sobre la junta para obtener una señal del desplazamiento relativo entre las partes.

El movimiento entre componentes puede detectarse acústicamente y las juntas con holgura responden al golpeteo con un sonido apagado y muy amortiguado.

Las partes internas inaccesibles de las máquinas se pueden examinar usando la inspección boroscópica u otras técnicas ópticas.

- **Control de la temperatura**

Las variaciones frecuentes de la temperatura de un equipo se pueden monitorizar fácilmente. Los sensores de temperatura son los termómetros, termopares, termistores, pinturas y polvos térmicos y cámaras de infrarrojos.

Dos ejemplos donde el monitorizado de temperatura nos alerta de problemas mecánicos son la temperatura del lubricante de salida de cojinetes y la temperatura del agua de refrigeración de la máquina.

- **Control del lubricante**

La utilización de filtros magnéticos en la salida en las unidades de lubricación es de todos conocida. La existencia de partículas magnéticas de material da información del estado de las superficies de las partes desgastadas de los cojinetes. Examinar el aceite y los filtros revelará la existencia de partículas en suspensión o depositadas en los filtros.

Tanto el desgaste de un nuevo tren de engranajes como el inicio de la fatiga en el contacto están acompañados de pérdida de material. pero la forma de las virutas es muy distinta en ambos casos.

- **Detección de pérdidas**

Se dispone de varias técnicas para la detección de fugas que incluyen los métodos de agua jabonosa. El uso de preparados específicos puede hacer el método más efectivo, capaz de detectar pérdidas tan insignificantes como 1 :l/s.

- **Monitorizado por vibraciones**

Este método puede utilizarse para detectar una amplia gama de fallos en la maquinaria, teniendo una aplicación más amplia de control que cualquier otra técnica.



Por ejemplo, la medida de vibraciones cerca de los cojinetes de la máquina puede detectar y diferenciar entre desequilibrio, desalineamiento del eje, fallo de cojinetes, fallo en engranajes y otro elemento de transmisión, desgaste, cavitación y numerosos fallos más.

Aunque los métodos básicos de monitorización son simples, en muchos casos se puede extraer una gran cantidad de información procedente de las medidas si se aplican las técnicas de procesado de señal.

- **Control de ruidos**

Además de en la detección de sonidos espaciales, como los generados por las fugas, el control de ruidos se puede aplicar de la misma forma que la monitorización de vibraciones. Sin embargo, aunque un ruido es indicador del estado de un equipo, éste se origina a partir de la vibración de alguna parte de dicho equipo, por lo que normalmente es más efectivo monitorizar la vibración original.

- **Control de corrosión**

Algunos dispositivos eléctricos cambian su resistencia a medida que progresa la corrosión. Usando probetas especiales se puede medir la velocidad de corrosión a partir de la resistencia de polarización de la probeta, ya que la simple medida del potencial entre el electrodo de referencia y el sistema indicará si existe corrosión.

9.2.2. Técnicas de control en parada

- **Inspección visual, acústica y al tacto de las partes en movimiento o inaccesibles**

El estado de la mayoría de los componentes de las transmisiones puede examinarse visualmente de una forma rápida, así por ejemplo el estado superficial de los dientes de los engranajes nos ofrece mucha información.

Los problemas de sobrecarga, fatiga, desgaste y pobre lubricación de los engranajes pueden diferenciarse a partir del aspecto de sus dientes.

- **Detección de fisuras**

La mayoría de los fallos importantes están precedidos por el crecimiento de una grieta a partir de un punto de concentración de tensiones o de un defecto del material en la superficie del componente. Los fallos por fatiga generalmente aparecen sin aviso. Sin embargo, lo que ocurre es que los inicios de las fisuras no son normalmente visibles en una inspección somera. Para superar estas dificultades se han desarrollado varias técnicas de detección de fisuras.



1. Ensayo de líquidos penetrantes en la superficie de las fisuras: Las fisuras hasta tamaño de 0,025 :m se pueden observar a simple vista.
2. Ensayo de pulverizado de partículas magnéticas: Una fisura u otro defecto que cruza las líneas del campo magnético (que se induce localmente en la superficie del material utilizando imanes tipo –U) origina que el polvo magnético se localice alrededor de la grieta sobre la superficie. La existencia de este campo y, por tanto, la fisura se localiza utilizando las partículas magnéticas.
3. Ensayo de resistencia eléctrica: La presencia de la fisura aumentará la resistencia medida entre dos probetas en contacto con la superficie. A pesar de las dificultades con la superficie de contacto, este método puede usarse para detectar y medir la profundidad de las grietas.
4. Ensayo de corrientes inducidas: Una bobina por la que circula corriente situada cerca de la superficie induce corrientes de Foucoult en el material. Estas corrientes se detectan o por un cambio en la inductancia de la bobina generadora o en la de otra bobina. Aunque no es necesario disponer de una superficie suave y limpia, pueden aparecer problemas de interpretación de resultados.
5. Ensayo de ultrasonidos: Los ultrasonidos generados en la superficie del equipo se reflejarán en cualquier superficie en el trayecto del sonido en el caso de detectarse algún fallo. El tiempo de retraso entre la generación del pulso del sonido y la detección de la reflexión proporciona una medida de la distancia de la superficie a la fuente. El rango de operación normal en acero se encuentra entre 0,5 y 300 mm.
6. Examen radiográfico: Las imperfecciones pueden fotografiarse utilizando Rayos X o gamma con una fuente radioactiva y material fotográfico especial. Se pueden detectar fisuras y un cambio de espesor del 2%. El espesor suele limitarse a 50 mm. El método puede requerir desmantelar la unidad a examinar y plantea problemas asociados con la protección del personal a las radiaciones.

7.

- **Detección de fugas**

La detección por ultrasonidos puede aplicarse a las unidades fuera de servicio colocando un generador ultrasónico en el interior del equipo que se examina.

- **Ensayo de vibraciones**

La respuesta de un sistema a una vibración puede revelar mucha información. Uno de los ensayos más comunes para máquinas rotativas es el de “RUN-DOWN” que se realiza cuando se está procediendo a la reducción de la velocidad que antecede a la parada total y que aplica el efecto de amplificación de las vibraciones cuando el sistema entra en resonancia.



- **Control de corrosión**

Además de los métodos descritos en servicio, el avance de la corrosión se puede determinar instalando probetas en el equipo y retirándolas periódicamente para su posterior medida y pesada. Las medidas de espesor por ultrasonidos detectarán el cambio en las dimensiones debidas a la corrosión.

9.2.3. Técnicas de control de condición de aplicación general

Sólo tres de las técnicas de control de condición descritas anteriormente pueden ser consideradas como verdaderos métodos de control de “aplicación general”. Estas son el control de temperatura, de lubricación y de vibración. En cada uno de los tres, el parámetro que se está controlando contiene información que ha sido transmitida por la máquina.

Estas tres técnicas se describen con mayor detalle en apartados posteriores.

9.3 Control de lubricantes

No es posible examinar los elementos de trabajo de una máquina compleja en operación, ni tampoco conveniente desmontar la máquina. Sin embargo, el aceite que circula a través de esta máquina muestra las condiciones en que se hallan las partes de la misma con las que se encuentra durante su recorrido. Analizar el aceite y alguna de las partículas que arrastra, permite controlar el estado del equipo en carga o parada. Para ello se utilizan varias técnicas, algunas de ellas muy simples y otras que requieren ensayos laboriosos y equipos caros.

9.3.1. Técnicas de control de lubricantes

El examen de lubricantes puede revelar los residuos depositados, las partículas en suspensión o el estado del aceite propiamente dicho.

- **Residuos depositados**

De las partículas arrastradas por el lubricante, las más grandes pueden ser recogidas en filtros o colectores magnéticos.

1. **Filtros**: La cantidad de residuos acumulados en un filtro se controla en operación midiendo la presión diferencial a través del filtro. La extracción del filtro, que se puede hacer con la máquina en marcha si está convenientemente diseñada, y el posterior análisis de los residuos con el microscopio para establecer su tamaño y contorno, y con un espectrómetro para determinar su composición, proporciona un método para detectar cambios significativos en alguno de los componentes que han estado en contacto con el lubricante.



2. Colectores magnéticos de residuos: Son un medio adecuado para la recogida de componentes ferrosos. Las placas magnéticas pueden diseñarse para ser desmontadas fácilmente con la máquina en operación. El colector magnético se puede examinar sin extraerse, dando una indicación de la composición de los residuos.

- **Residuos en suspensión**

Las partículas más pequeñas arrastradas por el lubricante permanecerán en suspensión. Está confirmado que el análisis de las partículas en suspensión avisa más rápido de daños en los componentes de la máquina. Para realizar las medidas cuantitativas hay que tener en cuenta las pérdidas de lubricante durante el funcionamiento y el efecto diluyente del relleno del aceite fresco sobre los residuos.

1. Análisis del aceite con espectrómetro (SOA): La concentración de materiales de desgaste críticos en el aceite se determina por un espectrómetro de emisiones o con un espectrómetro atómico de absorción, y cualquiera de los dos pueden medir la concentración de los elementos. Sin embargo, sólo proporciona información acerca de la velocidad de formación y su composición porcentual, pero no proporciona información sobre su forma.
2. Análisis ferrográfico del aceite: Es un medio para decantar partículas magnéticas, de una muestra de aceite en substrato, distribuidas en función del tamaño. Las partículas pueden ser analizadas por concentraciones, tamaño, distribución y forma.

- **Estado del aceite usado**

El aceite en sí mismo puede ser analizado más ampliamente como indicación de otras anomalías. Algunos de los síntomas y causas se muestran en la tabla siguiente:

Síntoma	Causas	Acción
Espuma	Exceso de agitación o paso bajo presión a través de restricciones	Revisar el sistema
	Contaminación por detergentes	Cambiar el aceite
Emulsión		
Se separa naturalmente	Agua mezclada	Drenar el agua
Se separa con centrifugación	Agua mezclada	Cambiar el aceite
Color oscurecido	Oxidación del aceite	Cambiar el aceite
	Exceso de temperatura	
	Combustión o existencia de otros productos en el aceite	

9.3.2. Anomalías detectadas mediante el control de lubricantes

Un cambio en la cantidad de los residuos recogidos indica un cambio en la condición de la máquina.



- Durante la puesta en marcha, el porcentaje de recogida de residuos disminuirá con el tiempo a menos que ocurra un fallo.
- Durante la vida normal, el porcentaje de residuos, su composición, tamaño y forma permanecerán constantes.

Cuando ocurra un cambio, el conocimiento de las variaciones en la composición de los residuos nos ayudará a determinar qué componente de la máquina ha cambiado.

Las partículas normales tienden a ser planas, mientras que las desprendidas por corte o abrasión suelen tener forma de espiral. La fatiga de superficie produce partículas angulares más largas.

Un análisis simple de la cantidad de residuos recogidos en filtros o placas magnéticas indicará daños en los cojinetes o superficies de deslizamiento, tales como engranajes u otros componentes de la transmisión. El uso de la espectrometría o ferrografía enriquecerán este control con datos que ayudarán en la determinación de los componentes dañados.

9.4 Control de temperatura

El control de la temperatura del componente de una máquina persigue uno de estos tres propósitos:

1. Permitir controlar manualmente la temperatura de un proceso o comprobar que está siendo controlada adecuadamente.
2. Detectar un incremento en la generación de calor debido a alguna disfunción, como por ejemplo un cojinete dañado.
3. Detectar cambios en la transmisión de calor de una máquina al exterior, causado por cambios en algunos de sus componentes tales como: Fallo en el circuito de refrigeración o deposiciones de ceniza en una caldera.

El primer punto se aplica con mucha frecuencia; sin embargo, el uso del control de la temperatura para la detección de disfunciones generales no es tan utilizado.

9.4.1. Localización de las medidas de temperatura

El control puede llevarse en un punto en el interior de un equipo, por ejemplo: temperatura del agua de caldera, de la superficie de un componente o un rodamiento. Las medidas superficiales suministrarán información más general sobre la generación de calor en una máquina, y sobre las vías de transmisión de calor a la superficie exterior o de intercambio de calor.

Desafortunadamente, la medida de temperatura superficial es más compleja que la de inmersión, dada la fuerte discontinuidad del perfil de temperaturas que habitualmente se



presenta en la superficie y que es fácilmente modificado por la instalación de sensores de temperatura. Por lo tanto, los sensores para medición en superficies deben restringirse a pequeños dispositivos como termopares, o sensores sin contacto, como medidores por radiación.

9.4.2. Instrumentos para el control de temperatura

- **Sensores de contacto**

Los instrumentos más ampliamente usados son aquellos que toman la temperatura del cuerpo con el que están en contacto y transmiten dicha información. Pueden proporcionar la indicación de la temperatura de manera local o remota. También pueden tener alguna función como en el caso de los termostatos.

El sistema de sujeción del sensor afecta tanto a la precisión como al tiempo de respuesta, por lo que es importante un buen contacto térmico. La mejor forma para medir la temperatura de la superficie es incrustar o soldar el sensor al cuerpo. El tiempo de respuesta está relacionado con el volumen del sensor, por lo que los más pequeños acusan más rápidamente los cambios de temperatura.

1. Sensores basados en la dilatación o expansión de líquidos: Son los sensores más utilizados. Los termómetros de mercurio o alcohol (de vidrio), son precisos pero frágiles. Estos dispositivos se utilizan cuando la indicación se necesita que esté disponible a una distancia entre 0,5 y 2 metros del sensor. Estos instrumentos son grandes, y por lo tanto inadecuados para medidas superficiales.

2. Sensores bimetalicos de expansión: Se pueden fabricar compactos y se emplean ampliamente en termómetros en los que la temperatura es alta o donde se necesita un elemento robusto. No se utilizan para la medida superficial y, en general, son menos precisos que los sensores basados en la dilatación de líquidos.

3. Termopares: Son los instrumentos de temperatura más pequeños y adaptables. Un par termoeléctrico, también llamado termopar, consiste en dos hilos de distinto metal soldados o unidos por uno de sus extremos y abiertos por el otro. Completan el sistema de medida un par de hilos de conexión que sirven para unir los extremos del termopar con la caja de lectura, con lo cual la longitud del termopar queda extendida o prolongada hasta la misma. La sensibilidad de los termopares más usados (cobre, constantan, cromo, alumel) es de $40 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ con una precisión de hasta $0,5^\circ\text{C}$. Existen diversos tipos de medidores especiales compactos para medidas de termopares tanto con baterías portátiles como alimentados por red.

Las uniones pueden ser de hasta 0,5 mm de diámetro por lo que, usando las debidas precauciones para minimizar los errores de conducción de los hilos, los termopares se pueden usar en zonas en donde el gradiente de temperatura es elevado. Son apropiados

para medir la temperatura superficial. Se pueden usar a elevadas temperaturas, recubiertos para protegerlos contra la corrosión.

4. Termorresistencias: Se usan como sensores elementos que cambian su resistencia con la temperatura. Dicho elemento puede ser un hilo o una pequeña película pegada a una superficie. Como la resistencia de la mayoría de los metales varía sólo $0,003 \Sigma/^{\circ}\text{C}$, estos medidores son poco sensibles y necesitan un puente con un galvanómetro muy sensible.

Los termistores son semiconductores cuya resistencia varía rápidamente con la temperatura. Un termistor típico encapsulado en vidrio mide 1,5 mm de diámetro y es 10 veces más sensible que los metálicos. El rango de temperaturas está limitado a unos 300°C y la resistencia con el tiempo tiende a variar. Una aplicación típica de los termistores es la medida de la temperatura del agua de recirculación en máquinas de combustión interna. Existen también termómetros portátiles basados en termistores.

- **Pinturas, testigos de color y bolas**

Un método muy simple de controlar la temperatura e el uso de pinturas, bolas y papeles que cambian de color a una temperatura conocida. Existen indicadores con cambios de color reversibles y con irreversibles, para la indicación de la máxima temperatura que se ha alcanzado. Las bolas indican la temperatura cuando se funden. Existen materiales que marcan un rango de temperaturas de 40 a 1400°C en intervalos que varían de 3°C a rangos bajos hasta 30°C a final de rango.

- **Sensores sin contacto**

La radiación de energía de un cuerpo varía con su temperatura absoluta T y la emisividad de la superficie radiante e de acuerdo con la ley de Stefan-Boltzmann:

$$E = \sigma \epsilon T^4$$

Así, se puede deducir la temperatura del cuerpo a partir de la energía radiante, sin ningún contacto directo. La mayor causa de imprecisión es la variación de la emisividad. Los métodos de medida, en orden de coste creciente son:

- Pirómetro óptico: Una parte importante de la radiación a unos 500°C se emite en el rango de frecuencia visible. Este fenómeno se usa para comparar el color de la radiación del cuerpo con un filamento caliente, lo que proporciona la lectura de temperatura con un 2% de error.
- Pirómetro de radiación: Se usan termopilas o celdas de sulfato de plomo para medir la energía radiante recibida de una superficie caliente, tanto en una banda particular de frecuencia (como por ejemplo infrarrojos) como en todo el espectro. La temperatura se

indica en un medidor con una precisión de un 2% en el rango de temperaturas de 50 a 4000 °C. El ángulo de visión varía entre 3° y 15°.

- Cámara infrarroja: Permite obtener un perfil de temperatura en escala de color sobre un monitor de televisión. Cubren un rango de 20 a 2000 °C y tienen una resolución de 0,2 °C a 20 °C. Estos equipos a pesar de ser muy caros ofrecen aplicaciones muy valiosas como por ejemplo la detección de puntos calientes.

9.4.3. Averías detectables mediante el control de temperatura

Además de la función principal del control de la temperatura como comprobación de que el proceso o sistema funcionan correctamente, hay varios tipos de fallos que se pueden detectar mediante el control de temperatura:

- Daños en rodamientos: Los daños sufridos tanto por rodamientos como por cojinetes lubricados por grasa o aceite producirán un incremento en la generación de calor. Puesto que los cojinetes no incorporan un sistema de refrigeración controlado por temperatura, este incremento de calor se traduce en un aumento de temperatura en la superficie del soporte del cojinete. Esto se puede detectar mediante un sensor colocado en la superficie (como un termopar) o, incluso mejor, por la diferencia de temperaturas de dos sensores montados uno en la superficie y otro a una pequeña distancia bajo la superficie. Cualquier contacto superficial en el cojinete, producido como resultado de un daño o desgaste, producirá calor que deberá ser transmitido a alguna superficie exterior para poder ser eliminado, pudiendo detectarse en la superficie.
- Fallos de refrigeración: Los fallos de lubricación o refrigeración se pueden detectar por una elevación de la temperatura en algún punto de la superficie del equipo. Estos fallos pueden proceder de un mal funcionamiento de la bomba por problemas internos o fallos del accionamiento, bloqueo de la tubería, válvula o filtro, o un daño en el intercambiador del refrigerante.
- Incorrecta generación del calor: Una combustión incorrecta en una máquina de combustión interna o en una caldera de fuel-oil puede causar una distribución de temperaturas irregular en la carcasa. Una serie de termopares adecuadamente localizados cuyas salidas sean registradas, puede mostrar una distribución irregular o un cambio en la misma. Para controlar rápidamente grandes zonas, se pueden utilizar pinturas sensibles a la temperatura o cámaras infrarrojas.
- Depósitos de materiales: Los depósitos de residuos o sedimentos en líneas, de cenizas o polvo en calderas o conductos, y de subproductos corrosivos, provocarán el aumento de aislamiento térmico, y por tanto, variaciones de temperatura en las superficies donde se depositen.



- *Daños en el aislamiento:* Cuando un elemento de la planta está aislado térmicamente los daños en el aislamiento se pueden detectar mediante cámara de infrarrojos. Las roturas en refractarias o en aislamientos darán lugar a puntos calientes o fríos.
- *Fallos en componentes eléctricos:* Cuando una conexión eléctrica no es buena, se genera calor por la resistencia de contacto entre los componentes, el cual puede ser fácilmente detectado mediante una cámara de infrarrojos. Por ejemplo, las líneas de alta tensión se controlan regularmente para detectar fallos en cables, conexiones, aisladores, etc. usando cámaras operadas desde un helicóptero. Fallos en componentes como rectificadores, tiristores y devanados se detectan como puntos fríos.

9.5 Monitorización de vibraciones y ruidos

Todas las máquinas vibran. Es difícil equilibrar las partes móviles, por lo tanto las vibraciones se originan en los elementos rotativos no equilibrados y en las aceleraciones de los componentes con movimiento rectilíneo. Los componentes que se mueven, rozan o giran sobre elementos adyacentes generan vibraciones debido a la rugosidad de las superficies de contacto. Las holguras en el ajuste entre componentes en contacto producen impactos. Los componentes de los cojinetes de apoyo, sometidos a esfuerzos cíclicos se deforman bajo carga y por tanto transmiten vibraciones.

Las vibraciones de la máquina producen ruido, cuyo nivel depende de la superficie de las partes vibrantes y de la eficacia de transmisión de ruido desde la máquina.

9.5.1. Elección entre medida de ruido o vibración

La elección entre la monitorización de ruido o vibración debe decidirse para cada situación concreta. Los niveles de ruido son a menudo más fáciles de medir puesto que no se necesita ningún instrumento en contacto con la máquina. Sin embargo, los ruidos parásitos pueden provocar interferencias. La medida de la vibración es más selectiva y más repetible, por esta razón se emplea con preferencia sobre la medida de ruidos. El transductor se coloca sobre o cerca de la parte de la máquina que se quiere comprobar. Por ejemplo, el transductor se situaría sobre el soporte del rodamiento si se quiere comprobar el estado de éste y sobre la carcasa de la bomba, si lo que interesa es detectar su cavitación. La mayoría de las vibraciones están asociadas con partes mecánicas móviles, por tanto, el soporte del rodamiento será el lugar adecuado para la mayor parte de las medidas.

9.5.2. El equipo

El transductor de ruido es un micrófono que convierte señales de presión acústica en señales eléctricas. El elemento de conversión es normalmente un componente piezoeléctrico o capacitivo acoplado a un diafragma sensible a la presión.

El transductor de vibración más común, el acelerómetro piezoeléctrico, se caracteriza por su pequeño tamaño, construcción robusta y amplios rangos de frecuencia. Existen otros transductores de vibración de bobina móvil que miden velocidad, se emplean también con cierta frecuencia, pero son pesados y voluminosos. Estos transductores fueron los primeros que se emplearon para monitorizar vibraciones pero han sido sustituidos por los acelerómetros piezoeléctricos en la mayoría de las aplicaciones.

La principal desventaja de cualquier transductor basado en el efecto piezoeléctrico es que el movimiento se convierte en una corriente que se disipa en el equipo acondicionador de la señal y en el cable. Si la velocidad de cambio del movimiento es baja esta disipación afecta significativamente a la lectura. De este modo se establece un límite inferior de frecuencia para la utilización del aparato. Sin embargo, los amplificadores de corriente, con impedancias de entrada del orden de $100\text{ G}\Omega$, permiten la realización de medidas a frecuencias de hasta $0,1\text{ Hz}$.

Todos los transductores necesitan un equipo acondicionador de la señal para convertir la señal de bajo nivel del transductor en una señal en la región de 1 V r.m.s. de lectura visual, cambio de rango y posibilidad de calibración, además del amplificador básico de señal, incorporando integradores para convertir la señal de aceleración en velocidad o desplazamiento. En la Figura 15 se muestra el diagrama esquemático de un medidor de vibración.

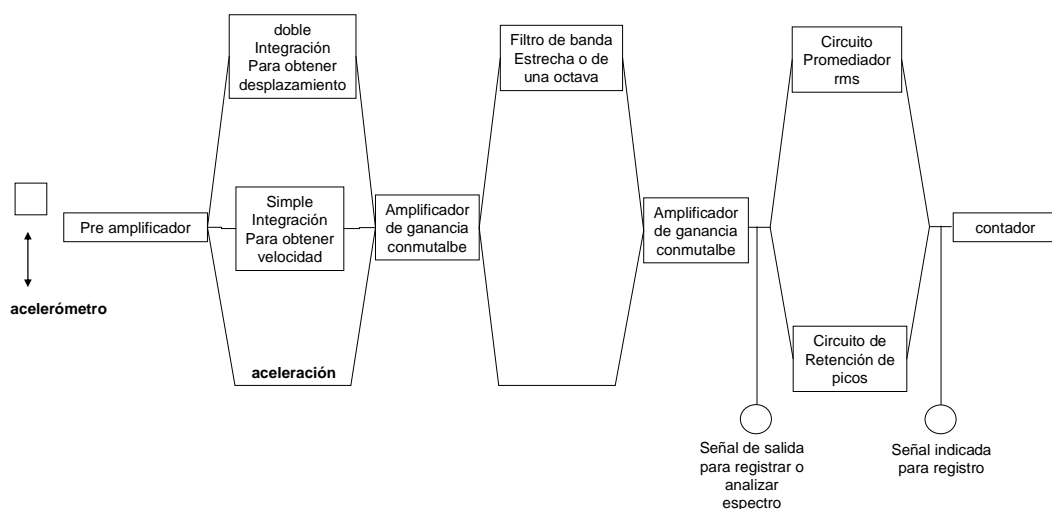


Figura 15. Diagrama esquemático de un medidor de vibración

9.5.3. La vibración o señal de ruido

Antes de discutir las variadas técnicas de monitorizado de señal es necesario examinar las características típicas de una vibración o señal de ruido y la forma en que se describen estas características.

La señal fluctúa temporalmente sobre un nivel medio.

La presión debida al ruido se superpone, y fluctúa, sobre la presión atmosférica. Un acelerómetro montado verticalmente está sometido a aceleración gravitacional constante además de a una vibración fluctuante. En tales casos, la componente constante se elimina en las etapas de procesamiento de la señal.

La señal puede tener una de las siguientes formas:

1. Sinusoidal pura como la que sería generada por un rotor desequilibrado. La señal está compuesta por una sola frecuencia. Para describir el tamaño de la señal se pueden usar el valor pico o el valor de la raíz cuadrada de la media de los cuadrados (r.m.s.), ya que para una onda sinusoidal están directamente relacionados, por ejemplo:

$$V_{pico} = \sqrt{2} \cdot V_{r.m.s.}$$

La señal se vuelve a repetir en periodos dados por 1/frecuencia.

2. Periódica pero no sinusoidal conteniendo como componentes muchas frecuencias discretas. La relación entre el pico y los valores r.m.s. de la señal y las magnitudes relativas de las componentes de las distintas frecuencias cambian ambas con la forma de la señal. Tal señal sería la generada por el movimiento del pistón de un motor de combustión interna y por las fuerzas de combustión. El periodo de repetición de esta señal corresponde al componente de frecuencia más bajo o fundamental, y viene dado por 1/fo.
3. Aleatoria y no repetible. El flujo de un fluido generaría esta señal, así como el movimiento de superficies sólidas en contacto. El valor de pico no es de interés ya que, al menos en teoría, llega a infinito en periodos infinitesimales. En la práctica cualquier señal aleatoria tiene un límite superior de frecuencia, lo cual implica una limitación en el tamaño del pico. Así, una señal aleatoria se describe por su valor de r.m.s. y por su espectro de frecuencia, que es continuo en un amplio rango de frecuencias.
4. Cualquier combinación de sinusoidal, periódica y aleatoria, como por ejemplo, la que se puede medir en el cojinete de un pequeño motor eléctrico.

Así, cualquier señal se puede describir por una medida de sus magnitudes, por ejemplo, la raíz cuadrada de la media de los cuadrados del valor del tiempo medio, y una medida de su espectro de frecuencias.

La raíz cuadrada de la media de los cuadrados del valor del tiempo medio es la medida generalmente aceptada del tamaño de una señal. Se define por la expresión:

$$V_{r.m.s.} = \sqrt{\left[\frac{1}{T} \int_0^T V^2 dt \right]}$$

donde V es el valor instantáneo de la señal, que fluctúa sobre cero. El tiempo medio, T, debe ser mucho mayor que el periodo del componente de más baja frecuencia de la señal.

No es casualidad que el valor del tiempo medio r.m.s. sea tan ampliamente aceptado. El cuadrado de la señal de vibración o la señal de ruido es una medida del contenido energético de la señal. La energía cinética es proporcional al cuadrado del desplazamiento y la energía acústica es proporcional a la presión al cuadrado. Así, el valor r.m.s. de una señal refleja el valor medio de la energía. Por tanto, el valor medio al cuadrado de una señal se puede obtener mediante el sumatorio de los valores medios al cuadrado de las frecuencias que componen la señal, esto es:

$$(V_{r.m.s.}^T)^2 = \sum_n (V_{r.m.s.}^n)^2$$

donde n representa las distintas componentes de la señal. Para una señal periódica, la media cuadrática cinética total es simplemente la suma de la media de los cuadrados de cada frecuencia componente. En el caso de la señal aleatoria, la media cuadrática viene dada por el área comprendida por la curva del espectro de frecuencia. Este concepto de suma de los cuadrados de las medias de las componentes es importante cuando se trata del monitorizado de señales.

9.5.4. Técnicas prácticas de monitorización de vibraciones

La monitorización en marcha es el método más usado para control de vibración o ruido. A continuación se describen las técnicas aplicadas específicamente a vibraciones.

1. *Mediciones periódicas con instrumentos portátiles.* Este es un método básico que proporciona información sobre los cambios de condición o estado del equipo. Los instrumentos portátiles son utilizados intensivamente y con frecuencia por una sola persona. El intervalo entre mediciones debe ser determinado por la experiencia. Si la maquinaria controlada se avería frecuentemente el periodo entre mediciones deberá acortarse. En cualquier caso la frecuencia de medición puede ajustarse con la experiencia de cada tipo de máquina en relación con la frecuencia de averías, gravedad de los efectos de la avería y el grado de precisión ofrecido por el tipo de instrumentación utilizada.

2. *Monitorización continua con instrumentos instalados permanentemente.* La monitorización continua se emplea cuando los fallos de la máquina ocurren muy rápidamente y/o cuando los resultados del fallo son totalmente inaceptables.

9.5.5. Localización de los puntos de medición y montaje de transductores

La localización de los transductores depende del tipo de defecto que se desee controlar. Es importante situar los transductores en elementos de máquinas que transmitan apropiadamente la vibración.

Los materiales tienen masa y son elásticos, cada componente tendrá una frecuencia natural a la que vibrará con mayor magnitud en respuesta a una excitación dada. Los componentes no responderán significativamente a excitaciones con frecuencias muy por encima de su frecuencia natural.

Para que la vibración alcance al transductor es importante montar éste sobre un componente que tenga una frecuencia natural elevada, por ejemplo un componente rígido. No sería adecuado montarlo sobre un elemento flexible de la carcasa, ni tampoco sería realista utilizar accesorios endebles para sujetarlo a la máquina.

9.5.6. Análisis de frecuencias

En muchas situaciones, un cambio en la vibración, indicativo de problemas, a una frecuencia determinada, puede ocultarse tras una vibración dominante, pero aceptable a otra frecuencia. En estos casos el análisis de frecuencia es fundamental.

Cuando se conoce de antemano la frecuencia de vibración asociada a un problema de mantenimiento, el análisis de frecuencias proporciona indicaciones adicionales muy útiles.

En el proceso de análisis de frecuencias se utiliza una red de filtros eléctricos para rechazar parte del espectro de frecuencias, permitiendo que pase el resto del espectro a través del filtro.

9.5.7. Monitorización de señales pico

Algunos tipos de mal funcionamiento de máquinas, tales como fallo en cojinetes, producen impulsos que se transmiten al transductor. Un cojinete o rodamientos de bolas picado, por ejemplo, emite un impulso cada vez que una bola entra en contacto con la picadura. Esto produce un incremento del nivel de vibración r.m.s., especialmente a la frecuencia de impacto, por lo que tiene un mayor efecto en el pico de vibración. El ratio de nivel de vibración pico frente al nivel de vibración r.m.s. es una medida de la cantidad de daño generado por el impulso.

9.6 Métodos de diagnóstico en el mantenimiento predictivo

9.6.1. Diagnóstico basado en modelos

Independientemente de la técnica de control utilizado se puede emplear el diagnóstico basado en modelos. Que se caracteriza por emplear un modelo de la planta o sistema bajo consideración. El modelo se emplea para generar salidas que mediante un análisis posterior permiten determinar la ocurrencia de un fallo o el cambio a un estado que precede a la ocurrencia del fallo.

Una de las posibilidades que se tiene al hacer diagnóstico basado en modelo es generar mediante dicho modelo las series que son captadas con los sensores que funcionan en el sistema bajo estudio.

En la Figura 16 se muestra el esquema de este procedimiento.

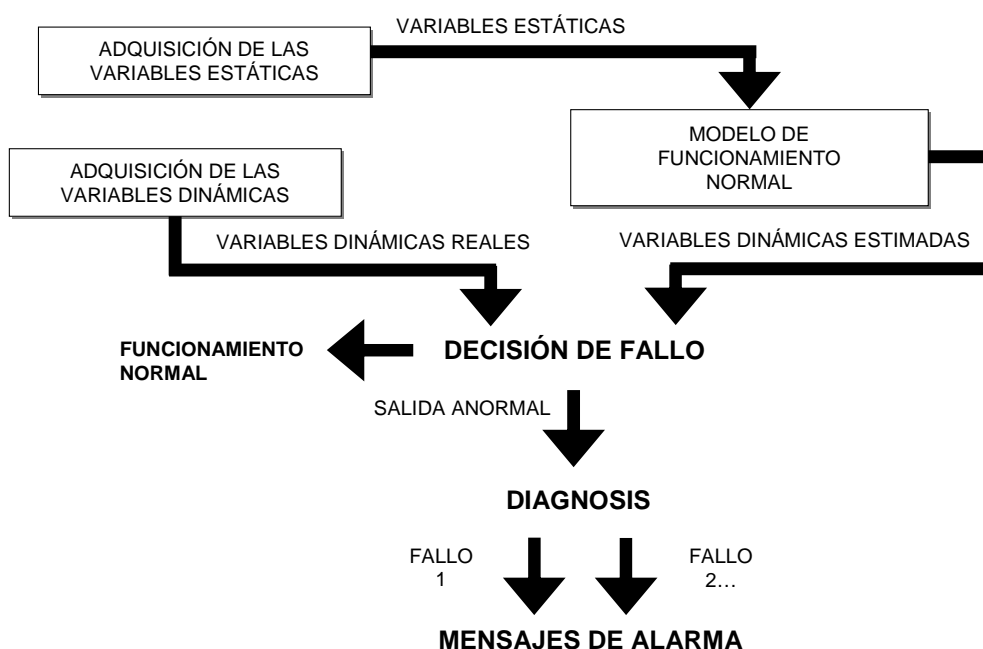


Figura 16. Esquema del mantenimiento basado en modelos

Las medidas registradas por los sensores son comparadas con los valores generados por el modelo de funcionamiento normal. A partir de las discrepancias se concluye la presencia o ausencia de fallo.

9.6.2. Mantenimiento predictivo basado en sistemas expertos

Los SISTEMAS EXPERTOS (S.E.) son una parte de la INTELIGENCIA ARTIFICIAL (I.A.), rama de la informática que intenta conseguir que los ordenadores simulen la inteligencia humana.

Un Sistema Experto es un programa de computadora interactivo que contiene la experiencia, conocimiento y habilidad propios de una persona o grupos de personas especialistas en un área particular del conocimiento humano, de manera que permitan resolver problemas específicos de ése área de manera inteligente y satisfactoria.

Los dos componentes principales de cualquier Sistema Experto son una BASE DE CONOCIMIENTOS y un PROGRAMA DE INFERENCIA, o también llamado MOTOR DE INFERENCIAS.

Los PROGRAMAS DE INFERENCIA manipulan la información almacenada en la base de conocimiento mediante procesos de búsqueda y comparación de patrones.

- Los sistemas expertos y el mantenimiento predictivo

En el campo del mantenimiento predictivo los sistemas expertos se utilizan fundamentalmente como herramientas de diagnóstico. Se trata de que el programa pueda determinar en cada momento el estado de funcionamiento de sistemas complejos, anticipándose a los posibles incidentes que pudieran acontecer. Así, usando un modelo computacional del razonamiento de un experto humano, proporciona los mismos resultados que alcanzaría dicho experto.

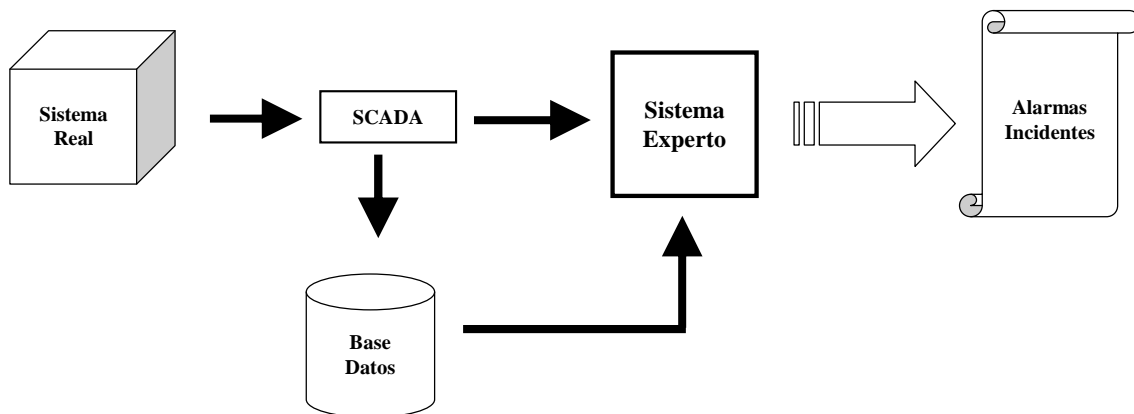


Figura 17. Sistemas expertos y mantenimiento predictivo

9.6.3. Mantenimiento predictivo basado en redes neuronales

Las redes neuronales artificiales son una representación del cerebro humano que intenta simular su proceso de aprendizaje. El término artificial indica que las redes neuronales se implementan en un ordenador capaz de realizar el gran número de operaciones que conlleva el proceso de aprendizaje

- Componentes de una red neuronal artificial.

Aunque hay una gran variedad de redes neuronales, todas ellas tienen una estructura común. Al igual que en el cerebro humano, una red neuronal está formada por neuronas y las conexiones entre ellas. Las neuronas intercambian información entre ellas a través de las conexiones que las unen. Estas conexiones están caracterizadas por un parámetro llamado peso y que sirve para dar más importancia a unas conexiones frente a otras.

La Figura 18 muestra la estructura general de una neurona artificial

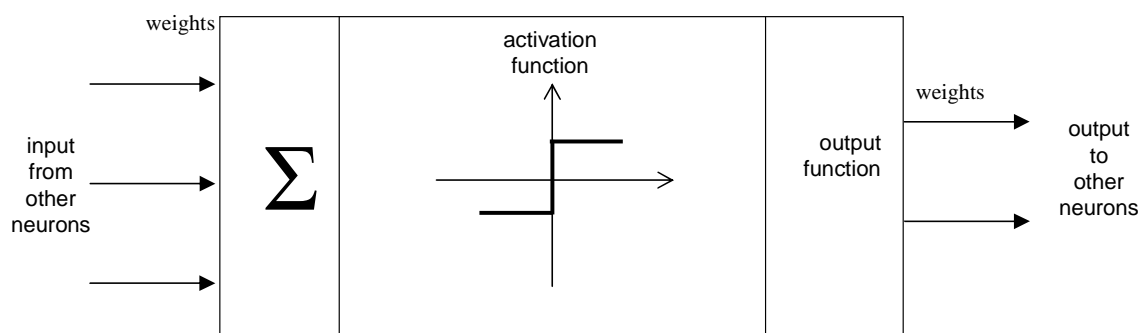


Figura 18. Esquema de una neurona artificial

- Las redes neuronales y el mantenimiento predictivo

En el campo del mantenimiento predictivo las redes neuronales pueden ser empleadas de diversos modos. Pueden usarse para modelar el sistema en cuestión, de modo que pueda hacerse una comparación entre las salidas del sistema y las de la red neuronal. Las discrepancias pueden ser un indicativo de un funcionamiento anómalo del sistema. También puede usarse su capacidad para discernir la pertenencia a una clase u otra de los datos que llegan a la red. Otra manera de emplear las redes neuronales es predecir las salidas futuras de una serie determinada, de manera que sea posible anticiparse a los fenómenos que pudieran ocurrir en el sistema.



10. BIBLIOGRAFÍA

- Dhillon, B.S. *Engineering maintenance. A modern approach*. Boca Raton: CRC Press, 2002. ISBN: 1587161427.
- González, Francisco Javier. *Teoría y práctica del mantenimiento industrial avanzado*. Madrid: Fundacion Confemetal, 2003. ISBN: 8496169030.
- Kelly, A. *Gestión del mantenimiento industrial*. Madrid: Fundación Repsol, 1998. ISBN: 8492350601.
- MONCHY, François. *Teoría y práctica el mantenimiento industrial*. Barcelona: Masson, 1990. ISBN: 8431105240.
- REY, Francisco. *Hacia la excelencia en mantenimiento*. Madrid: TGP Hoshin , 1996. ISBN: 8487022219.
- REY, Francisco. *Manual del mantenimiento integral en la empresa*. Madrid: Fundación Confemetal, 2001. ISBN: 8495428180.
- SMITH, David John. *Reliability, maintainability and risk: practical methods for engineers*. Oxford etc Butterworth Heinemann, 2001. ISBN: 0750651687.