

TECNICATURA SUPERIOR EN MANTENIMIENTO INDUSTRIAL

MANTENIMIENTO INDUSTRIAL I

Materia Integradora del primer año.

Año 2004

Temas 5 a 9

Profesor: Ing. Julio S. Morales
E-mail: jsmorales@bblanca.com.ar

INDICE

TEMA 5 - Mantenimiento centrado en la fiabilidad (MRC)	2
<i>Siete preguntas básicas</i>	2
<i>Registro de los equipos e instalaciones</i>	2
Identificación de Equipos y Componentes	3
<i>Funciones</i>	3
<i>Comportamiento funcional</i>	4
<i>Fallos funcionales</i>	4
Probabilidad de los fallos	5
Tipos de curvas de probabilidad de fallos	5
<i>Efectos de los fallos</i>	6
<i>Consecuencias de los fallos</i>	6
Consecuencias no evidentes	6
Consecuencias sobre la Seguridad, la salud y el Medio ambiente	6
Consecuencias operacionales	7
Consecuencias no-operacionales	7
<i>Resumen y toma de decisión</i>	7
<i>Conclusiones</i>	7
TEMA 6 - MANTENIMIENTO PREVENTIVO, PREDICTIVO, PROACTIVO	8
<i>Mantenimiento preventivo</i>	8
Tareas cíclicas "a condición"	8
Tareas de acondicionamiento cíclico o de sustitución cíclica	10
El proceso de selección	11
<i>A falta de tareas preventivas adecuadas</i>	12
Tareas cíclicas de búsqueda de fallo	13
Ningún mantenimiento preventivo	15
Rediseño	15
Estrategia de mantenimiento - Diagrama de decisiones	18
<i>Monitoreo de condición (Condition Monitoring)</i>	20
<i>Efectos dinámicos</i>	20
Vibraciones	20
Emisión acústica	21
Monitoreo de partículas	21
Monitoreo químico	21
Monitoreo de efectos físicos	22
Monitoreo de la corrosión	24
Introducción al análisis de vibraciones	24
Medición de vibraciones	25
Introducción a la corrosión	26
Protección catódica	29
Protección anódica	31

TEMA 5 - Mantenimiento centrado en la fiabilidad (MRC)

Como concepto general, podemos decir que la actividad de mantener es asegurar que todo elemento físico de un equipo o instalación desempeñe las funciones deseadas en forma continua. El mantenimiento, por lo tanto, se propone preservar el estado original de diseño o normal de operación. Es evidente que para que esto sea posible los equipos deben ser capaces de cumplir las funciones para las cuales fueron seleccionados y que la selección haya tenido en cuenta la condición operacional real. El mantenimiento centrado en la fiabilidad se caracteriza por:

- Considerar la fiabilidad inherente o propia del equipo / instalación.
- Asegurar la continuidad del desempeño de su función.
- Mantener la calidad y capacidad productiva.
- Si deseamos aumentar la capacidad, mejorar el rendimiento, incrementar la fiabilidad, mejorar la calidad de la producción, necesitaremos un rediseño. También en el caso que nos propongamos bajar el comportamiento esperado.
- Tener en cuenta la condición operacional: dónde y cómo se está usando.

El MRC es una estrategia / proceso que se enfoca en asegurar que un elemento físico continúe desempeñando sus funciones normales, en su condición operacional real.

En muchos casos se obtiene la mejor disponibilidad y menor costo haciendo que un equipo o sus componentes, sean preventivamente cambiados o reparados a intervalos fijos.

Esto es solo verdad para equipos sencillos o complejos con causa o modo de falla dominantes. Ejemplos de estos pueden ser revestimientos de tolvas, refractarios de hornos, cuchillas de corte. En general cuando hay contacto directo con el producto, lo que implica desgaste. También el modo de falla dominante puede estar vinculado a la edad; debido a fatiga, oxidación o corrosión.

Siete preguntas básicas

Pero en equipos cada vez más complejos la idea de reemplazos o reparaciones a intervalos de tiempo fijo no es aplicable. La realidad de las plantas actuales muestra claramente que los equipos y componentes ya no tienen un modo o causa de fallo dominante.

El proceso RCM se caracteriza por partir del análisis de las siguientes preguntas, aplicadas a cada máquina o parte de la instalación:

1. Cuáles son sus funciones y su comportamiento funcional?
2. De qué forma pueden fallar esas funciones?
- 3.Cuál es la causa o modo de cada posible fallo?
4. Cuáles son los efectos; qué sucede cuando falla?
5. Cuáles son las consecuencias, severidad, de cada posible fallo?
6. Qué se puede hacer para prevenir los fallos?
7. Qué sucede si no se pueden prevenir los fallos?

Registro de los equipos e instalaciones

Resulta imprescindible, en primer lugar, conocer todos los equipos, elementos y partes de la instalación, para poder después considerar cada uno de ellos apropiadamente. Para ello es conveniente mantener un sistema ordenado de registro de los mismos. Básicamente pueden considerarse los siguientes niveles de agregación: Planta: es un conjunto de equipos, máquinas e instalaciones cuyo propósito es obtener un determinado producto a partir de sus materias primas. Se requerirán, además, servicios complementarios tales como energía, vapor, gas combustible, catalizadores, etc. En ocasiones nos encontramos con conjuntos de plantas vinculadas entre sí por ser algunas de ellas proveedoras de las materias primas o servicios requeridas por otras. Estamos en presencia de Complejos Industriales.

Unidades funcionales, sectores o áreas industriales: dentro de cada planta nos encontraremos con procesos y operaciones unitarias, diversas. Por ello, y para hacer más fácilmente comprensible el análisis, es habitual desagregar la instalación en partes, cada una de las cuales solo desarrolla un proceso o una operación. A estos sectores se los denomina, con frecuencia, unidades funcionales.

Equipos, máquinas: a su vez las unidades funcionales están integradas por varios equipos, máquinas, etc. (bombas, intercambiadores, torres, cintas transportadoras, compresores, etc) vinculados entre sí de tal modo que todos ellos son necesarios para

el correcto funcionamiento de la unidad funcional. Si alguno de ellos falla, lo más probable es que toda la unidad funcional pierda su capacidad operativa, aunque algunos equipos puedan seguir funcionando.

Componentes: Los equipos o máquinas están muchas veces formados por varios componentes. Estos son partes constitutivas del equipo y normalmente el fallo de un componente obliga al paro de todo el equipo o máquina. Por ejemplo: una bomba esta integrada por un motor, una caja reductora o multiplicadora de velocidad, acoplamiento y la bomba propiamente dicha. El fallo de cualquiera de estos componentes detiene toda la función de bombeo.

Partes o repuestos: el mayor nivel de desagregación son los repuestos o partes de reemplazo de los componentes. Estas partes, con frecuencia son mantenidos en almacenes a efectos de realizar reemplazos rápidos. Se utiliza la experiencia y la historia de los equipos para determinar cuales son las partes de reemplazo que conviene tener a mano. Habitualmente son partes que los fabricantes aconsejan disponer en planta por tratarse de piezas de corta vida útil o de desgaste.

Identificación de Equipos y Componentes

Sobre la base de los diferentes niveles de desagregación: componentes, equipos, máquinas que hemos descrito anteriormente, es posible establecer nombres cortos, no más de 6 o 7 caracteres alfanuméricos, identificatorios. Estos nombres suelen denominarse "TAG" o "ID". Así podemos establecer nombres muy breves que facilitarán la comunicación cotidiana y la escritura de informes técnicos. Por ejemplo:

1. Las unidades funcionales, áreas o sectores de una planta, pueden denominarse mediante un par de caracteres numéricos: 10, 20, ... etc. Por ejemplo: la instalación de generación de vapor será la unidad funcional 10; la unidad de proceso de reacción química será la UF 20; etc.
2. Los equipos, máquinas, etc, y sus componentes, serán identificados por un grupo de caracteres formado por una letra y dos números, por ejemplo: las bombas serán B01, B02 . . ., las torres T01, T02 . . ., los intercambiadores I01, I02, ..., los compresores C01, C02, . . ., los motores M01, M02, . . . etc.
3. De este modo el TAG o ID de un equipo cualquiera podrá denominarse por ejemplo: B1002, que indentificará a la bomba 02 de la instalación de generación de vapor; T2003 identificará a la torre 03 de la unidad de proceso de reacción química; etc

Funciones

La función de los equipos en su contexto operacional real, no necesariamente coincide con las funciones de diseño. El comportamiento funcional depende de ese contexto real. Es por lo tanto menester determinar el comportamiento funcional en todos sus aspectos: calidad, seguridad, cantidad de producción, costos.

Podemos distinguir tres tipos principales de funciones:

Funciones primarias: son aquellas que originan la necesidad de la existencia del equipo o instalación. Una bomba es requerida para transportar un fluido desde un lugar a otro; un reactor es el recipiente donde se produce una reacción o transformación deseada; un generador de vapor debe producir vapor a cierta presión y temperatura, a partir de agua como materia prima; etc. etc. Todas éstas son las funciones primarias de tales elementos: bomba, reactor, generador de vapor.

Funciones secundarias: son aquellas requeridas para el correcto cumplimiento de la función primaria. La bomba, además de mover el fluido debe contenerlo, impidiendo su derrame; también debe evitar la formación de fases indeseables (vapores) o la separación de partes del fluido que maneja (sedimentación de partes sólidas en suspensión); el reactor, además de producir la reacción debe contener los reactivos evitando su derrame, debe evitar la separación o segregación de los mismos; el generador de vapor, además de producirlo debe mantener la presión, temperatura y caudal requeridos, etc. etc. En términos generales podemos decir que las funciones secundarias pueden estar vinculadas a: contención, soporte, higiene, seguridad, parámetros de control, tales como presión, temperatura, caudal, etc., que están vinculados a la calidad y cantidad producida.

Funciones de protección o seguridad:

Cada vez más, las instalaciones industriales poseen elementos de protección o seguridad automáticos. Estos elementos actúan de diversas maneras; por ejemplo:

1. actuar una alarma cuando una función está alcanzando un prefijado nivel de desvío, respecto a su funcionamiento normal;
2. detener un equipo cuando tal desvío alcanza un nivel de riesgo inaceptable;
3. poner en funcionamiento un equipo o elemento auxiliar que corrija, sustituyendo a la función principal, ante un desvío funcional inaceptable;

4. eliminar o disminuir las condiciones anormales que suceden debido a un fallo o desvío funcional;
5. proteger situaciones naturalmente inseguras para otorgarles un nivel de seguridad aceptable.

Muchas de estas funciones de protección se caracterizan por ser funciones no evidentes, ocultas; es decir que en condiciones normales de funcionamiento de la instalación es desconocido si tal función está en condiciones de operar, cuando sea necesaria. Esto se presenta especialmente en los tipos 1 a 4.

Comportamiento funcional

Hemos considerado los tipos básicos de funciones que un equipo o instalación puede tener, pero ahora debemos considerar el comportamiento funcional de los mismos. Habitualmente todo equipo o instalación posee una habilidad propia o inherente que es su capacidad de diseño. También con frecuencia, los equipos e instalaciones tienen asociadas funciones o habilidades deseadas; es decir la prestación que deseamos que el equipo consiga, que son diferentes que aquellas del diseño.

Si un equipo tiene una capacidad inherente menor que aquella que deseamos que realice, fallará con frecuencia y no habrá procedimientos de mantenimiento ni preventivos que corrijan el problema. Mantener una máquina que es incapaz de desempeñar la función deseada es imposible: o se modifica el equipo o se bajan las expectativas funcionales.

El comportamiento funcional no solo está referido a la capacidad productiva sino también a la calidad, la eficiencia energética, la seguridad el cuidado del medio ambiente.

Fallos funcionales

Una vez fijados los comportamientos funcionales, será necesario identificar cómo, cada elemento en su función, puede fallar. El fallo funcional es la incapacidad de un elemento o componente de un equipo para satisfacer plenamente su comportamiento funcional deseado en el contexto operacional real. Equipos idénticos pueden tener funciones y/o contexto operacional y/o comportamiento funcional diferentes y por lo tanto tendrán fallos funcionales diferentes. A modo de ejemplo dos bombas iguales A y B, bombean un mismo fluido a determinado caudal y presión, pero la bomba B tiene una bomba C de reserva. Si falla la bomba A se pierde totalmente la función de bombeo, en tanto que si falla la B, podrá restaurarse la capacidad de bombeo simplemente sustituyéndola por la C. En este caso el contexto operacional es diferente y por lo tanto sus fallos funcionales.

Hasta hace algunas décadas, la simplicidad del comportamiento funcional permitía admitir el fallo de un equipo a todo o nada. Hoy los equipos son muy complejos y necesitamos contestarnos cuál es el grado de deterioro de una función que puede admitirse, antes que digamos que ha fallado. Hoy consideramos que una función está fallando cuando su comportamiento funcional es insatisfactorio. La gravedad de un comportamiento funcional insatisfactorio, depende de sus consecuencias y éstas, a su vez, dependen del contexto operacional y del comportamiento funcional.

Por esto definimos como fallo funcional la incapacidad de un equipo o instalación de satisfacer el comportamiento funcional deseado, en su contexto operacional real. Esto es más o menos sencillo en algunos casos. Por ejemplo si una máquina envasadora de azúcar debe llenar 100 bolsas por hora, de 1 kg, con una tolerancia de 5 g en más o menos, será fácil definir como fallo funcional toda vez que:

1. se detenga,
2. llene menos de 100 bolsas por hora,
3. llene bolsas con más de 1005 g,
4. llene bolsas con menos de 995 g.

En cambio, en el caso de una pérdida de aceite lubricante en el cojinete de una máquina rotativa podrá ser considerado, por el equipo de seguridad y cuidado del medio ambiente, un fallo cuando aparezca una marca de aceite en el piso que implique un nivel indeseado de contaminación ambiental o se incremente el riesgo de hacer resbalar a una persona que pase por ese lugar; en tanto que el responsable de lubricación, dirá que hay fallo cuando se incremente significativamente el consumo del lubricante. Finalmente, para el operador el fallo será cuando suene la alarma de alta temperatura en el cojinete o se detenga la máquina por agarrotamiento del cojinete, si no se dispone de un sistema de monitoreo de la función de lubricación. Es evidente que dependiendo de cual sea el punto de fallo funcional seleccionado, será el nivel de mantenimiento preventivo a aplicar.

Esto nos indica que en cada caso debemos establecer el comportamiento funcional deseado. También que, así como cada elemento puede tener asociado más de una función, puede presentar diferentes fallos funcionales. Básicamente podemos considerar fallo cuando estamos frente a una pérdida total de la función o solo la pérdida parcial. Similarmente podemos ver cómo el contexto operacional modifica las consecuencias de un fallo. En el ejemplo de las bombas A que opera sola y B que posee una bomba C de reserva, el fallo funcional podrá presentarse de las siguientes formas:

1. Pérdida total de la función si se detiene la bomba A.
2. Recuperación de la función de bombeo si falla la B y es sustituida por la C.
3. Pérdida total de la función si se produce el fallo de la B en momentos que la C está inoperable.
4. Ninguna pérdida de función si falla la bomba C cuando la B está funcionando normalmente.

Probabilidad de los fallos

Es muy importante identificar los modos o causas de fallo que tienen más posibilidad de causar la pérdida, total o parcial, de una función. Esto nos permite identificar qué debemos prevenir, identificando la causa de cada fallo y evitando confundir la causa con los efectos.

Durante mucho tiempo se consideró que la probabilidad de que un elemento falle estaba directamente vinculado a la edad o envejecimiento. Esto es cierto cuando un elemento está afectado de una causa dominante de fallo (fatiga, corrosión, desgaste, etc.). Sin embargo, los elementos cada vez más complejos que forman las instalaciones industriales muestran que su probabilidad de fallo no siempre está vinculada con su edad o envejecimiento. Hoy es posible encontrar los siguientes tipos de curvas de probabilidad de fallo:

Tipos de curvas de probabilidad de fallos

Tipo A: Comienza con una tasa de fallo alta en el inicio (mortalidad infantil, muchas veces vinculada a deficiencias de fabricación) y luego puede ser constante o ascendente. Termina, finalmente, con un crecimiento rápido de la tasa de fallo (habitualmente vinculada a una causa dominante de fallo: desgaste, corrosión, fatiga).

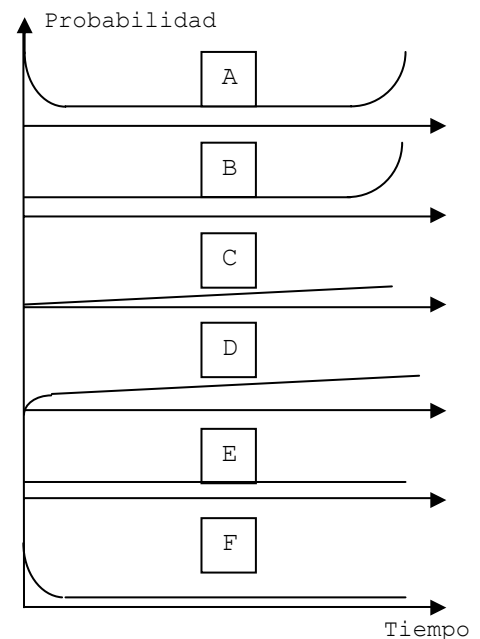
Tipo B: Un período de probabilidad constante o ligeramente ascendente. Termina con un crecimiento rápido (similar a la etapa final del caso A).

Tipo C: Ligeramente ascendente pero sin edad definida identificable.

Tipo D: Probabilidad de fallo bajo, cuando el equipo es nuevo. Luego aumenta rápida y constantemente.

Tipo E: Fallo constante en todas las edades y ocurrencia aleatoria.

Tipo F: Comienza con una mortalidad infantil alta, que desciende a una probabilidad muy baja o constante.



Estadísticas de la aviación civil

4% modo A	7% modo D
2% modo B	14% modo E
5% modo C	68% modo F

- Estadísticamente, cuanto más complejos son los equipos o sistemas, responden a E y F.
- No necesariamente lo que ocurre en aviación ocurrirá en la industria.
- La edad no necesariamente tiene que corresponderse con la fiabilidad, salvo cuando hay un modo de falla dominante.

Efectos de los fallos

Al considerar el o los efectos de cada fallo (qué pasaría si ocurriera el fallo), debemos tener presente que aquí es muy difícil establecer reglas generales, ya que los efectos de los fallos dependen del contexto operacional específico de cada equipo y sus vinculaciones con el resto de la instalación. No obstante es importante destacar los siguientes lineamientos que debemos considerar frente al análisis de un posible fallo:

- Habrá evidencia cuando se ha producido un fallo?
- Supone el fallo una amenaza para la S. S & M. A.?
- Cómo afecta el fallo a la producción (calidad, cantidad, costos)?
- Que daños físicos pueden suceder si se produce el fallo?
- Qué debe hacerse y cuánto tiempo demanda corregir el fallo, cuando éste se ha producido?

Consecuencias de los fallos

Toda vez que se produzca un fallo, habrá algún tipo de efectos, directos o indirectos, sobre la seguridad o el comportamiento funcional de una planta industrial. En qué medida la planta queda afectada depende de: el contexto operacional del equipo que ha fallado, su comportamiento funcional y los efectos físicos de la causa o modo del fallo ocurrido. Esta combinación de efectos, comportamiento funcional y contexto operacional, nos sugiere que cada fallo tendrá consecuencias específicas asociadas a él.

Si volvemos al ejemplo de las bombas A, que trabaja sola y la B que tiene de reserva a la bomba C. Es evidente que el fallo de la bomba A hace fracasar la función de bombeo. En cambio el fallo de la B, requerirá solamente de su sustitución por la C para que la función continúe. Si falla la bomba C, cuando la B está normalmente operando, no habrá consecuencias sobre la función de bombeo. Finalmente si falla la B cuando la C está inoperable las consecuencias son tan graves como en el caso del fallo de la A.

Aunque las tres bombas sean idénticas y los modos de fallo sean los mismos, las funciones de cada bomba son distintas, sus contextos operacionales son diferentes y por lo tanto las consecuencias de sus fallos son muy diferentes en cada caso. Es fácil ver que el mantenimiento preventivo para cada caso está más vinculado a las consecuencias de los fallos que a los fallos mismos. La bomba A requerirá un nivel de atención más alto que la B, por ser más graves sus consecuencias. La bomba C tendrá una atención muy especial, dado que su fallo será oculto y solo se hará evidente si se produce el fallo de la bomba B.

Este ejemplo nos muestra que el mantenimiento preventivo que debe realizarse depende de las consecuencias del fallo que nos proponemos evitar con tal mantenimiento. En otras palabras: Merece la pena realizar una tarea preventiva si resuelve adecuadamente las consecuencias que nos proponemos evitar. Más aún si resulta imposible prevenir el fallo, la naturaleza de sus consecuencias nos indicará las acciones que habremos de tomar. Es decir que el análisis de las consecuencias nos dará la base para decidir si merece la pena realizar un determinado mantenimiento preventivo.

Veremos ahora los diferentes tipos de consecuencias que se nos pueden presentar:

Consecuencias no evidentes

Hemos visto, al hablar de funciones, la existencia de funciones no evidentes u ocultas. Estas funciones presentarán fallos que en la mayoría de los casos también serán ocultos. Por ejemplo fallas en las protecciones de equipos. Las consecuencias directas también permanecerán ocultas, pero expondrán a otras más graves, cuando falle la función protegida. En otras palabras, estos fallos ocultos y sus consecuencias quedarán expuestos y se harán evidentes cuando suceda un fallo en la función protegida. Estaremos aquí en presencia de un fallo múltiple y sus consecuencias podrán ser muy graves, y hasta catastróficas.

Consecuencias sobre la Seguridad, la salud y el Medio ambiente

Este es el caso de fallos funcionales que tienen consecuencias para la seguridad de las personas o las instalaciones, la salud o el cuidado del medio ambiente. En este último caso infringiendo leyes o regulaciones.

En estos casos el análisis se efectúa, en modo tal de priorizar a las personas y al medio ambiente frente a la producción o a las cuestiones económicas.

Consecuencias operacionales

Este es el caso de fallos que tienen consecuencias sobre la calidad del producto, la cantidad de producción o que provocan costos industriales altos, en adición a los costos directos de la reparación.

Estas consecuencias cuestan dinero y su costo nos indica cuánto se debe gastar en prevenirlos. En otros términos, las consecuencias operacionales nos llevan a un análisis económico que nos indicará la conveniencia de realizar un determinado nivel de mantenimiento preventivo. Tal análisis tendrá en cuenta no solo los costos de las reparaciones o del mantenimiento preventivo que debe realizarse, sino también los costos asociados a la producción, o mejor aún a la falta de producción derivada de tales fallos.

Consecuencias no-operacionales

En este tipo, los fallos no afectan en forma directa a la seguridad ni a la operación, por lo que el único gasto directo es el de la reparación. La realización de algún tipo de mantenimiento preventivo estará asociado a un análisis económico en el que se compararán los costos del mantenimiento preventivo frente al de las reparaciones.

Ejemplos de esto son los fallos en: pinturas, edificación no operativa, iluminación perimetral, etc.

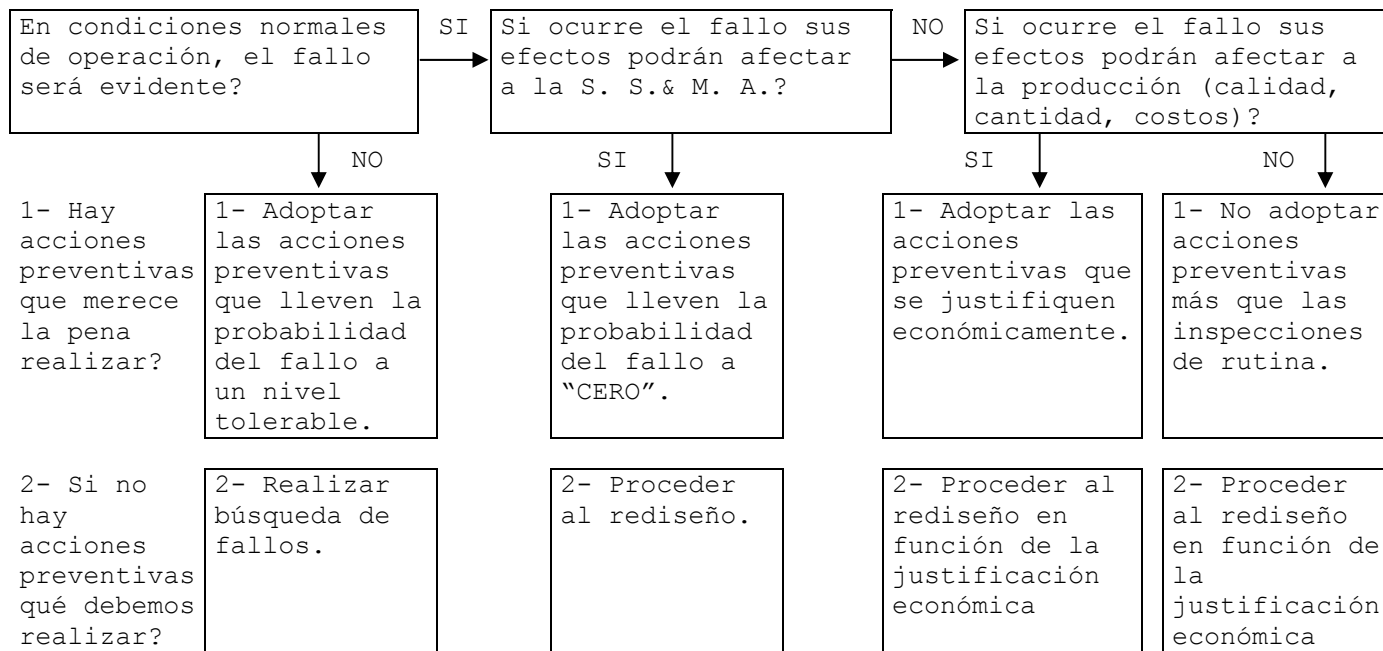
Resumen y toma de decisión

Si un fallo tiene consecuencias significativas en cualquiera de las 3 primeras categorías, es importante prevenirlos.

En su defecto, no merece la pena hacer cualquier tipo de mantenimiento preventivo / predictivo, más allá de las rutinas de mantenimiento.

Estamos aquí frente a la toma de decisión: Qué debemos hacer en cada caso?

Esta metodología de trabajo, RCM, nos conduce al siguiente análisis:



Conclusiones

Este enfoque gradual de análisis implica que las tareas preventivas solo se especifican para elementos que la necesitan realmente. También implica que seguramente las tareas restantes se harán mejor, por disponer más conocimiento, tiempo y orden en la ejecución.

Una diferencia importante es considerar los requerimientos de mantenimiento de cada pieza por sus características técnicas reales, su contexto operacional, la severidad y consecuencias de cada fallo.

Anteriormente se usaban programas similares para todas la máquinas, aún cuando se encontraran en contextos diferentes. Este proceso analiza los requisitos del mantenimiento de cada pieza antes de preguntarse si es necesario volver a considerar el diseño.

Mantenimiento preventivo

Hemos visto, al analizar las consecuencias de los fallos, que el objetivo básico de aplicar un mantenimiento preventivo es evitar, o al menos reducir, tales consecuencias. De esto se deduce que:

- ✓ Si la función, y por lo tanto el fallo de la misma, es oculta, la tarea de mantenimiento preventivo que apliquemos debe disminuir la probabilidad de ocurrencia de un fallo múltiple a un nivel aceptable. Si no se puede encontrar una tarea preventiva adecuada, entonces tendremos que implantar un sistema de búsqueda de fallo.
- ✓ Si el fallo implica consecuencias que afectan la seguridad, salud o cuidado del medio ambiente (S.S.&M.A.) la tarea preventiva deberá reducir a un nivel bajísimo o a "cero", la probabilidad de ocurrencia del fallo. Si no encontramos una tarea preventiva apropiada, tendremos que pasar al rediseño. Interinamente y hasta tanto las modificaciones puedan implementarse, podremos aplicar la mejor tarea preventiva que hayamos encontrado.
- ✓ Finalmente, si el fallo supone consecuencias operacionales o no operacionales, el costo total de realizar una tarea preventiva deberá ser más bajo que los costos de no realizarla. Es decir que en estos dos casos la realización de tareas preventivas deberá justificarse económicamente.

Las tareas preventivas pueden considerarse encuadradas dentro de alguna de las siguientes categorías:

- Tareas a condición.
- Tareas de acondicionamiento cíclico.
- Tareas de sustitución cíclica.

La posibilidad de aplicación de alguna de estas categorías está vinculada principalmente a los dos siguientes factores: la relación entre la edad del elemento y su probabilidad de fallo y lo que sucede una vez que el fallo ha comenzado a producirse.

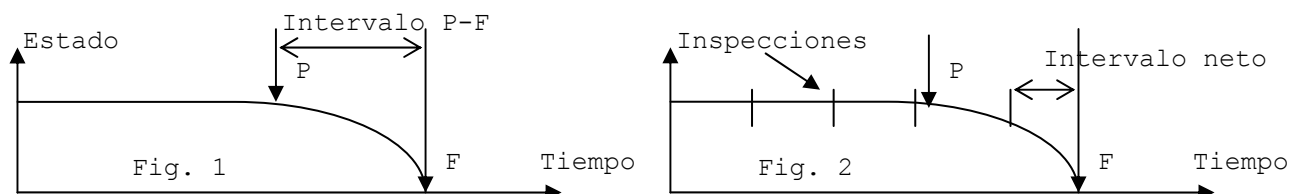
Hemos visto ya que hay tres tipos de curvas de probabilidad de fallo: A, B y C, en las que existe una clara dependencia entre la edad de los elementos y su probabilidad de fallo. En tanto que en los casos D, E y F, superado el momento inicial, la probabilidad de fallo no está asociada al envejecimiento.

Tareas cíclicas "a condición"

Las tareas cíclicas a condición se aplican en los casos D, E y F y está basado en el hecho que, en la mayoría de estos casos, aplican los dos siguientes criterios:

- ✓ La probabilidad de fallo permanece constante a lo largo de la vida del elemento, y por lo tanto puede producirse en cualquier momento, lo que nos impide prefijar tiempos para realizar reparaciones o sustituciones preventivas.
- ✓ Los fallos no son instantáneos sino que se desarrollan en un período de tiempo y podemos encontrar evidencias que el proceso de fallo ha comenzado, antes que sus efectos y consecuencias se manifiesten.

Podemos expresar este proceso de desarrollo de un fallo como se muestra en la siguiente figura, donde en abscisas se muestra el estado del elemento y en ordenadas el tiempo. El punto P representa el momento en que el fallo muestra alguna evidencia y F el momento del fallo funcional



Mediante el uso de técnicas predictivas podemos obtener advertencias de que el fallo ha comenzado (P). A este momento lo denominamos "fallo potencial"; esto es que algunas condiciones físicas nos indican que el fallo ha comenzado a producirse y que dentro de cierto tiempo el "fallo funcional" se hará evidente (F). [Fig. 1]

Para detectar fallos potenciales establecemos tareas cíclicas de inspecciones que nos permita detectar el fallo potencial, antes que suceda el fallo funcional. Es evidente que este tipo de inspecciones conforman un tipo de búsqueda de fallo.

Nuestro principal problema consiste en determinar con que frecuencia realizaremos las inspecciones [Fig. 2]. Para esto será clave el intervalo de tiempo comprendido entre P y F. En forma práctica podríamos fijar la frecuencia igual a la mitad del período P-F. Esto nos garantizaría que detectar el fallo potencial antes que se produzca el fallo funcional y con tiempo suficiente para evitarlo. Esto parece fácil, sin embargo hay que tener en cuenta que el punto P depende de las herramientas con que contamos para detectar el desarrollo del fallo. Se han desarrollado técnicas que permiten diagnosticar con suficiente tiempo de anticipación, pero no siempre disponemos de ellas. Además cuanto más fina es la herramienta de detección, habitualmente más alto su precio y más elevado el nivel de especialización requerido para su operador, lo que se suma a los costos.

Todo esto nos lleva al concepto de intervalo neto, que es el tiempo real que disponemos desde que detectamos la evidencia del fallo hasta que ocurra el fallo funcional.

Por otra parte, algunas veces el período P-F es tan pequeño que cuando detectamos el fallo potencial ya no tenemos tiempo para solucionarlo. En estos casos realizar tareas a condición no son técnicamente factibles.

Como regla general podemos decir que las tareas a condición son técnicamente factibles si:

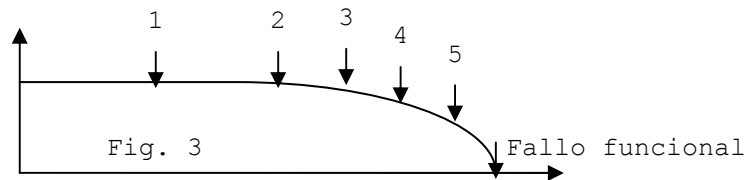
- ✓ Hay una clara condición de fallo potencial que nos advierta anticipadamente.
- ✓ El intervalo de tiempo P - F es consistente; es decir que fallos similares tienen también desarrollos similares.
- ✓ El intervalo de tiempo P - F es suficientemente largo para permitirnos realizar las tareas que eviten el fallo funcional o reduzcan la importancia de sus consecuencias.
- ✓ Es posible realizar inspecciones con una frecuencia menor que el intervalo P - F, ya que en caso contrario, el fallo potencial pasaría inadvertido.

Las técnicas principales de inspecciones cíclicas pueden agruparse en las siguientes categorías:

- ✓ Verificaciones basadas en los sentidos humanos, en especial el tacto, la visión, y la audición.
- ✓ Monitoreo de efectos primarios, tales como corriente, potencia, presión, temperatura, vibraciones, caudal, velocidad, etc.)
- ✓ Técnicas basadas en la calidad del producto, por ejemplo: estadísticas de algunos parámetros de la calidad.
- ✓ Monitoreo de condición (Condition monitoring), que utilizan efectos dinámicos, fenómenos físicos o químicos, etc.

Veamos ahora algunas consideraciones especiales cuando se aplican inspecciones cíclicas y tareas preventivas a condición:

- Debemos distinguir claramente entre fallo potencial y fallo funcional. Esto es debido a que lo que en ciertos contextos se toma como fallo potencial, en otras se considera como fallo funcional; por ejemplo: una pequeña fuga en vinculaciones de accesorios de una línea de vapor es tomada como un fallo potencial y se programarán reparaciones en la próxima oportunidad que la línea esté fuera de servicio; en cambio si se tratase de una fuga de una línea de un producto tóxico, será considerado como un fallo funcional ya que ninguna fuga es tolerable.
- También es importante distinguir entre el intervalo P - F y la edad del operacional del elemento. Esto es especialmente importante en caso de elementos cuya probabilidad de fallo es del tipo D, E o F; es decir que fallo aleatorio. Por ejemplo si se ha producido el primer fallo luego de cuatro meses de colocado un elemento, tendremos la tendencia a pensar que podemos inspeccionarlo dentro de unos dos meses. Sin embargo, por ser de tipo fallo aleatorio, el próximo fallo puede ocurrir dentro de, digamos, 15 días o un año. Por lo tanto tendremos que elegir una frecuencia de inspección más alta.
- Otro tema de gran interés es el fallo potencial múltiple. Podemos creer que un fallo funcional está siempre precedido por un solo tipo de fallo potencial. Esto no siempre es correcto. Algunos fallos funcionales pueden estar precedidos por varios fallos potenciales con diferentes intervalos P - F. Tomemos el caso de un fallo funcional de un rodamiento (Fig 3), considerado como agarrotamiento del rodamiento con parada de la máquina, donde: 1 - es el momento que el fallo comienza a desarrollarse; 2 - hay un cambio en las características de vibración; 3 - aparecen partículas metálicas en el aceite lubricante; 4 - hay un ruido diferente al habitual; 5 - la temperatura es más alta que lo normal.



En este caso solamente podremos detectar el cambio vibracional o de temperatura si el rodamiento está razonablemente accesible. La presencia de partículas de aceite puede verificarse si el sistema de lubricación es cerrado. Los niveles de ruido de la máquina pueden ser tan altos que no sea posible distinguir el ruido del rodamiento.

De todo esto podemos deducir que el sistema de tareas a condición con inspecciones cíclicas puede ser adoptado si se cumple alguno de los siguientes criterios:

1. Si la función es oculta y, por lo tanto, su fallo funcional, muchas de sus consecuencias solo aparecerán cuando se produzca el fallo múltiple; por lo tanto las tareas preventivas a condición solo serán aplicables si reducen a un nivel tolerable el riesgo de tal fallo múltiple.
2. Si el fallo supone consecuencias para la S. S. & M. A., solo merecerá la pena realizar tareas a condición si reducen la probabilidad del fallo a "0". Además el ciclo y la sensibilidad de las inspecciones deben ser tales que adviertan del desarrollo del fallo con suficiente tiempo: $P - F$, para poder tomar acciones correctivas antes que se produzca el fallo funcional.
3. Si el fallo tiene consecuencias operacionales, el costo de las tareas "a condición", en un determinado lapso de tiempo, debe ser menor al costo de las reparaciones más la producción o la calidad perdidas.
4. Si el fallo no tiene consecuencias operacionales, el único costo del fallo funcional es el de la reparación. De modo que merece la pena realizar las tareas a condición si su costo es inferior a aquel.

Tareas de acondicionamiento cíclico o de sustitución cíclica

En los casos en que la probabilidad de fallo de los equipos corresponde con alguna de las curvas A y B, resulta posible determinar un ciclo de vida con lo que las tareas de acondicionamiento o restitución cíclica son aplicables. Si la curva que aplica es del tipo C, se hace un poco más difícil, pero también puede lograrse.

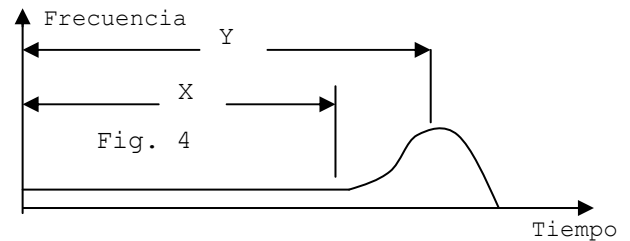
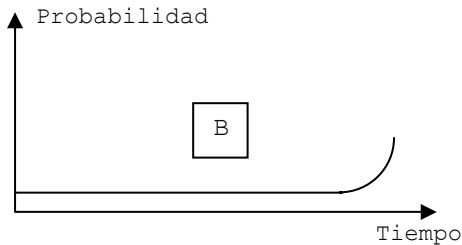
Recordemos que este tipo de curvas de probabilidad de fallo se dan en elementos simples o en aquellos que están afectados de alguna causa o modo de fallo dominante; por ejemplo: fatiga, desgaste, corrosión.

En este tipo de mantenimiento preventivo los equipos son revisados y sus componentes reparados o sustituidos por nuevos, con una frecuencia predeterminada, independientemente de su estado en ese momento. Para que esto sea posible deben darse las siguientes condiciones:

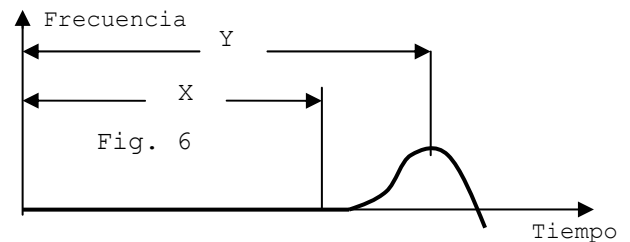
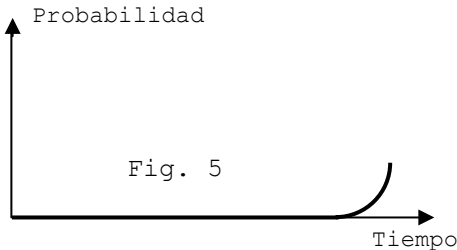
1. Hay una edad a partir de la cual la probabilidad de fallo funcional se incrementa rápidamente y por lo tanto es posible prefijar una "vida útil" del elemento.
2. Poseemos información que nos permite establecer con razonable exactitud la "vida útil".
3. Una gran mayoría de los elementos alcanza esa vida útil antes de producirse el fallo funcional.
4. Si se trata de un acondicionamiento cíclico, tal acondicionamiento restituye al elemento una condición igual a la original o es posible determinar una nueva vida útil (habitualmente más corta que la original) que también cumple las condiciones anteriores: 1, 2 y 3.

Consideremos la frecuencia de fallos de un elemento cuyo tipo de curva de probabilidad de fallo es la B. La figura 4 muestra que la vida media de los elementos será "Y"; en tanto que si se desea que la mayoría de los elementos sobreviva al momento del acondicionamiento o sustitución, la vida útil será inferior a "X". A este período también suele denominársele límite de "vida económica", porque compara ventajosamente el costo del mantenimiento preventivo con los costos de las reparaciones y pérdidas económicas.

Vemos que si las consecuencias del fallo son económicas, tendremos que asegurarnos que, en un determinado período de tiempo, el costo de los acondicionamientos o sustituciones son inferiores al costo de la reparación y pérdidas productivas si permitimos que se produzca el fallo funcional.



En cambio, si las consecuencias del fallo afectan la S. S. & M. A., una reducción en el número de fallos funcionales no será suficiente, ya que necesitamos que el número probable de fallo funcional sea Cero. Por lo tanto el tipo de curva de probabilidad de fallo debería ser como la Fig. 5 y la de frecuencias, como la Fig. 6: En este caso el período "X", también suele denominarse ciclo de "vida segura"



El proceso de selección

El mejor camino de selección de cuál tipo de mantenimiento preventivo aplicar comienza por el de ciclo de inspecciones y tareas a condición. Esto es así porque en la mayoría de los casos:

- ✓ El ciclo de inspecciones puede realizarse con los equipos funcionando, en el mismo lugar de su emplazamiento; es decir sin desmontarlo, por lo que no interfiere con el proceso productivo.
- ✓ Las inspecciones se enfocan en condiciones específicas de un fallo potencial, de modo que, detectado el fallo potencial, se pueden definir las acciones correctivas y programar los trabajos. Todo esto redundará en una mayor efectividad del mantenimiento.
- ✓ Las reparaciones o sustituciones se realizan cuando se ha detectado el fallo potencial, lo que permite aprovechar al máximo la vida útil de cada elemento.

Si no se puede encontrar un ciclo de inspecciones y tareas preventivas a condición, entonces la siguiente opción es el acondicionamiento cíclico. Las tareas de acondicionamiento cíclico, además de ser técnicamente factibles, requieren que exista una clara edad o vida media, de modo que el acondicionamiento oportuno reduzca sensiblemente la ocurrencia de fallos funcionales. Además sus costos deben justificarse económicamente, en relación a los costos de las reparaciones y pérdidas productivas, si las hubiera. Este tipo de mantenimiento preventivo presenta, en la mayoría de los casos, las siguientes desventajas:

- ✓ Su ejecución requiere que el equipo esté detenido.
- ✓ Muchas veces hay que desmontar y llevar los equipos al taller.
- ✓ El límite de edad, ciclo de acondicionamiento, prefijado se aplica a todos los elementos con lo que se pierde parte de la vida útil de aquellos elementos que pudieron superar esa edad.
- ✓ A lo largo de un período de tiempo se realizan más acondicionamientos que en el caso de "a condición".

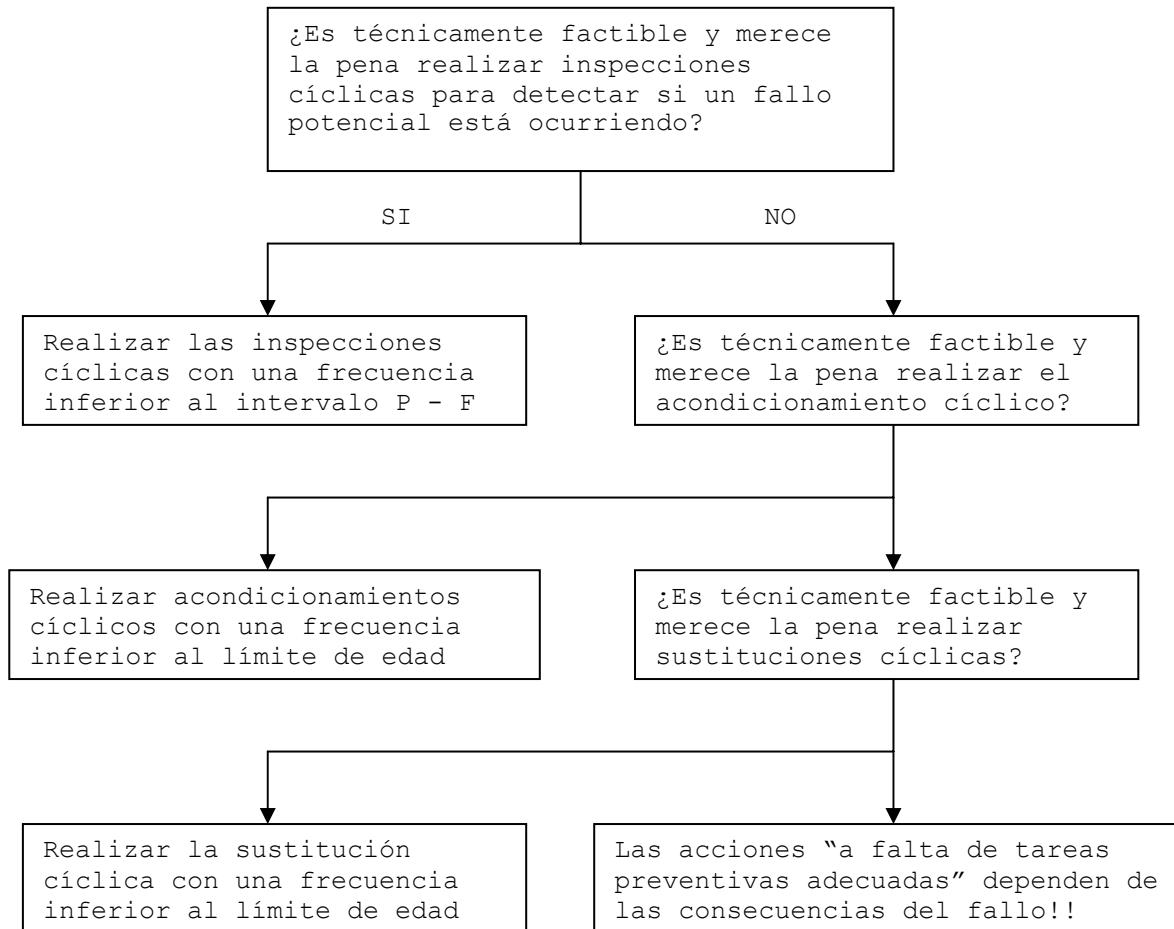
No obstante estas desventajas enunciadas, el acondicionamiento suele ser más atractivo que la sustitución porque se aprovechan nuevamente los elementos acondicionados en lugar de descartarlos.

La última opción es la sustitución cíclica. Este tipo de mantenimiento preventivo tiene las mismas desventajas que el acondicionamiento y obliga a utilizar piezas nuevas desaprovechando las usadas. Sin embargo, cuando las consecuencias del fallo funcional son importantes y en especial si el acondicionamiento no otorga a los elementos la misma fiabilidad de la pieza nueva, esta opción es preferida.

En ciertos casos, por ejemplo cuando el fallo funcional tiene consecuencias que afectan la S. S. & M. A., y no es posible encontrar una tarea que por sí sola reduzca el riesgo de fallo al nivel deseado, cero, suelen aplicarse métodos combinados; por

ejemplo inspecciones cíclicas y acondicionamiento o sustitución cíclicas. Cada una de estas actividades se realizan con ciclos de frecuencias específicamente determinadas.

El siguiente esquema nos muestra este proceso de selección:



A falta de tareas preventivas adecuadas

Si los casos anteriores son inaplicables; es decir si no encontramos tareas preventivas en cualquiera de las tres categorías ("a condición", "acondicionamiento cíclico" y "sustitución cíclica") tendremos que adoptar otro tipo de acciones. Aún si disponemos de una acción preventiva, tendremos que preguntarnos si, además de ser factibles, merece la pena realizarla. La respuesta depende de cómo reacciona la instalación a las consecuencias de los fallos funcionales. Dicho en otros términos, es necesario combinar la evaluación de las consecuencias con la evaluación de la reparación necesaria, en un proceso único de decisión, basados en los principios siguientes:

- Si la función es oculta, una acción para prevenir su fallo, solo merecerá la pena hacerla si es posible reducir el riesgo de un fallo múltiple, asociado con esa función, a un nivel bajo aceptable. Si no encontramos una tarea preventiva adecuada tendremos que adoptar tareas cíclicas de búsqueda de fallo.
- Si el fallo afecta la S. S. & M. A., y no se encuentra una tarea preventiva apropiada, habremos de considerar el rediseño del elemento.
- Si el fallo tiene solo consecuencias operacionales o no operacionales, la primera opción, a falta de una acción preventiva adecuada será "no realizar un mantenimiento preventivo". En todo caso se podrá considerar un rediseño si existe una justificación económica.

En suma, disponemos de tres tipos de acciones, cuando no disponemos de acciones preventivas adecuadas:

1. Búsqueda cíclica del fallo.
2. Ningún mantenimiento preventivo.
3. Rediseño.

Tareas cíclicas de búsqueda de fallo

Las tareas de búsqueda de fallo consisten en comprobar las funciones no evidentes (ocultas) de forma periódica para determinar si ya han fallado. Es evidente que se trata de tareas que no son preventivas, ya que se buscan fallos que ya se han producido. No obstante se consideran dentro del grupo de tareas preventivas porque se trata de evitar la ocurrencia de fallos múltiples; es decir que falle la función protegida cuando la función oculta ya ha fallado.

Por ejemplo, mientras conducimos nuestro automóvil, no podemos advertir si la rueda de auxilio está con baja presión, por lo que, si queremos evitar que una pinchadura en una de las cuatro ruedas nos encuentre sin su auxilio, es necesario que realicemos inspecciones periódicas de la presión de dicho neumático.

Pero: ¿Con qué frecuencia deberíamos realizar estas inspecciones?. En el caso planteado nuestra experiencia nos indica que es suficiente que la inspeccionemos antes de realizar viajes fuera de la ciudad, ya que en las áreas urbanas siempre tendremos algún servicio móvil de reparaciones que nos ayude a solucionar el problema.

Muy diferente es el caso de un generador de energía eléctrica de un hospital, cuyo objeto es mantener un servicio de emergencias, en caso de corte de la energía de la red pública.

Veremos ahora que la frecuencia de búsqueda de fallo está íntimamente vinculada a la disponibilidad deseada y a la fiabilidad del equipo o instalación.

Disponibilidad y frecuencia de búsqueda

Tomemos el caso del generador del ejemplo anterior, y consideremos la disponibilidad en un período de 5 semanas. Admitamos también que un fallo se ha producido al final de la primera semana y su reparación solo demandara un tiempo muy pequeño, digamos una hora.

1. Si la frecuencia de inspecciones fuera cada 5 semanas, pasarían 4 con el equipo en fallo hasta que lo advirtiéramos. La disponibilidad habría sido de 1 semana en 5; es decir el 20%. Estamos despreciando el tiempo de la reparación en este cálculo.
2. Si la frecuencia de inspecciones fuera cada 3 semanas, pasarían dos con el equipo en fallo hasta que lo advirtiéramos. Entonces la disponibilidad sería de 3 en 5 semanas; es decir el 60%. Estamos despreciando el tiempo de la reparación en este cálculo.
3. Si la frecuencia de inspecciones fuera cada 1 semana, pasaría solo el tiempo de la reparación (1 hora) con el equipo en fallo, con lo que la disponibilidad sería de 4.994 en 5 semanas; es decir el 99.88%.

Este ejemplo, teórico, muestra que cuánto más alta la frecuencia de inspecciones, más alta será la disponibilidad total del equipo en un dado período de tiempo.

Fiabilidad y frecuencia de búsqueda

En el ejemplo anterior hemos supuesto que el equipo falla una sola vez, en las cinco semanas tomadas para el cálculo. En la realidad los equipos pueden fallar mas frecuentemente y en ese caso también mayor será la frecuencia de búsqueda.

Podemos medir la fiabilidad de un equipo en términos del tiempo medio entre fallos (en inglés MTBF). Cuanto más fiable es un elemento, mayor es su MTBF, los fallos ocurrirán menos frecuentemente y menor será la frecuencia de búsqueda.

En suma, existe una vinculación entre la fiabilidad - MTBF - la disponibilidad deseada y la frecuencia de inspecciones de búsqueda de fallo.

Si la función es oculta y sus fallos aleatorios (curvas D, E y F), la tabla siguiente muestra la relación entre el MTBF, la disponibilidad deseada y la frecuencia de inspecciones de búsqueda:

Disponibilidad deseada de la función oculta	99.5 %	97.5 %	95.0 %	93.0 %	91.0 %	89.0 %
Frecuencia de las inspecciones de búsqueda en % del MTBF	1 %	5 %	10 %	15 %	20 %	25 %

Determinación de la frecuencia de búsqueda

Hemos visto ya que el nivel de prestación que necesitamos de un elemento de protección debe establecerse siguiendo los siguientes pasos:

1. Debemos, en primer lugar, determinar qué nivel de riesgo de ocurrencia del fallo múltiple es razonable aceptar.
2. Determinar la probabilidad de ocurrencia del fallo de la función protegida, en un período de tiempo determinado.
3. Determinar qué disponibilidad de la función oculta necesitamos, durante el mismo período, para reducir al nivel determinado en 1. el riesgo de ocurrencia del fallo múltiple.
4. Una vez completados los tres primeros pasos, podemos elegir la frecuencia de la tarea de inspecciones de búsqueda, que corresponda al nivel de disponibilidad deseada, en la tabla anterior.

Siguiendo con el ejemplo anterior:

- ✓ Supongamos que hemos determinado, en el paso 1., que la probabilidad de fallo múltiple aceptable es inferior a 1 en 10.000 (v. gr.: medida en horas).
- ✓ En el paso 2., hemos averiguado que la probabilidad máxima de cortes imprevistos del suministro eléctrico de la red pública es de 1 en 100, en un período de un año; es decir unas 87 hs en el año.
- ✓ Esto implicaría, paso 3., que el tiempo de fallo del generador de emergencias no debe superar el 1 % (1 en 100), por lo que la disponibilidad del generador debe ser mayor al 99%.

Para lograrlo, la tabla anterior nos indica que deberíamos realizar una tarea de búsqueda de fallo (verificar que está en perfectas condiciones de funcionamiento) con una frecuencia del 1% del MTBF. Si los antecedentes históricos del generador indican que el tiempo medio entre fallos es de 24 meses, es decir unas 17.500 hs, la frecuencia de inspecciones debería ser cada 175 hs; es decir cada 7 días o sea una vez por semana.

A modo de conclusión, vemos que la búsqueda cíclica de fallos solo aplica a las funciones ocultas. Las funciones evidentes tendrán fallos que serán también evidentes tan pronto se produzcan, por lo que carece de sentido la búsqueda de tales fallos. Siempre es preferible prevenir los fallos y no buscarlos cuando ya se han producido, por lo que solo debe aplicarse la búsqueda cíclica de fallos cuando no disponemos de una acción preventiva adecuada.

La acción de búsqueda de fallos tiene que ser tal que verifique el correcto funcionamiento de la función completa; es decir: si se trata de un lazo de instrumentación integrado por varios componentes que van desde un sensor hasta un actuador, debemos asegurarnos que verificamos el funcionamiento de todos los componentes.

- Para ello podemos simular las condiciones a las que el circuito debería responder y verificar que el actuador realiza su acción.
- Además debemos asegurarnos no perturbar ninguno de los elementos, por ejemplo realizando algún desarme y rearmado de algún elemento.

En la práctica nos encontraremos con casos en los que es imposible o desaconsejable realizar la búsqueda del fallo; por ejemplo:

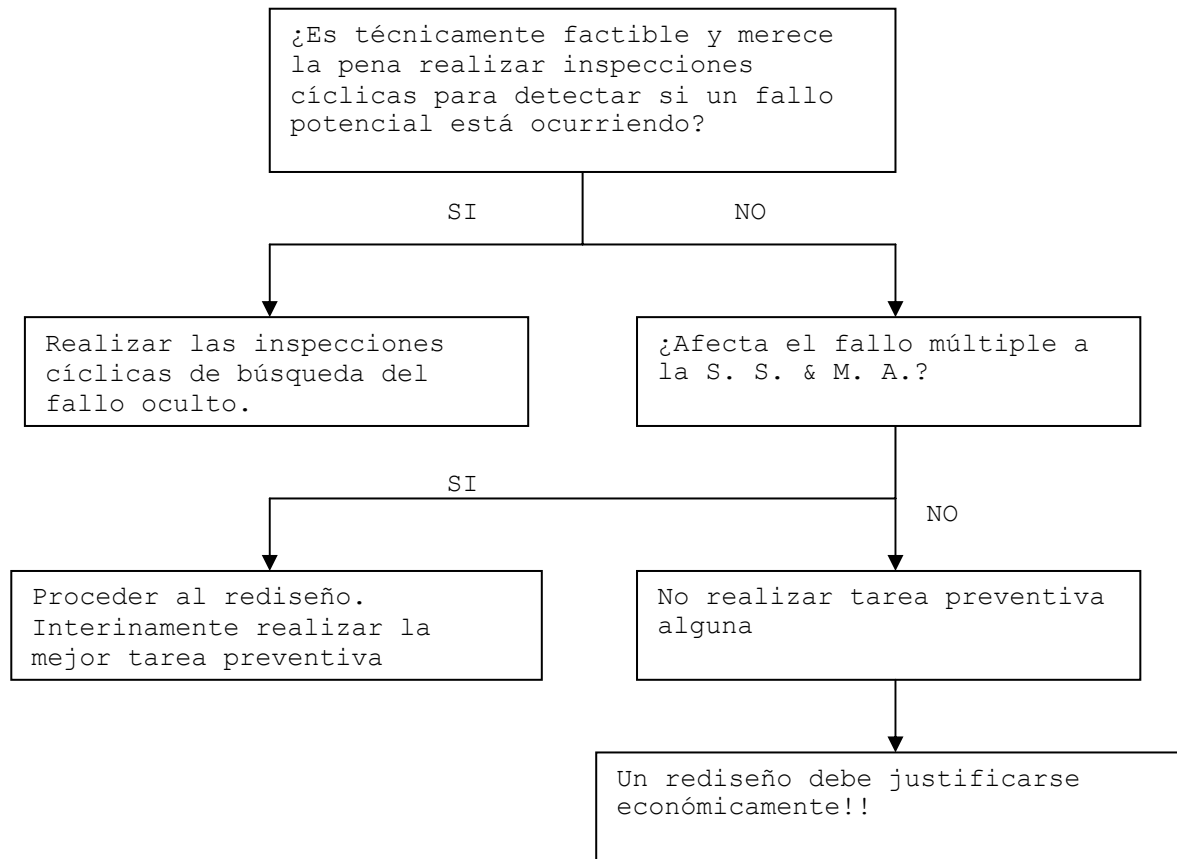
- Cuando la verificación del elemento de protección nos obliga a su destrucción (fusibles, discos de ruptura, etc).
- Donde es imposible acceder al dispositivo que debe verificarse.
- En las situaciones en que las condiciones que deben simularse, para que el dispositivo actúe, son peligrosas o se incrementan los riesgos del fallo múltiple.
- La frecuencia determinada (mediante los tres pasos antes-mencionados) es excesivamente baja (varios años).
- La frecuencia es tan alta que resulta impracticable o exige parar la producción.

Finalmente y a modo de conclusión podemos decir que:

- En los casos que no encontramos una tarea de búsqueda de fallo adecuada y el fallo múltiple puede afectar la S. S. & M. A., la siguiente opción es el rediseño.
- En los casos que no encontramos una tarea de búsqueda de fallo adecuada y el fallo múltiple no afecta la S. S. & M. A., la siguiente opción es no tomar acción preventiva alguna, salvo que la importancia de las consecuencias del fallo

múltiple (pérdidas productivas muy altas o costos muy elevados), entonces la siguiente opción será el rediseño.

El siguiente cuadro nos muestra el proceso de decisión:



Ningún mantenimiento preventivo

Tomaremos la decisión final de no realizar mantenimiento preventivo alguno y mantener en servicio los elementos hasta que se produzca el fallo funcional, cuando se den las siguientes características:

- La función y sus fallos no son ocultos y por lo tanto el fallo funcional se hará evidente tan pronto como se produzca.
- Los fallos funcionales no afectan la S. S. & M. A.

Esto quiere decir que si no encontramos una acción preventiva adecuada para una función evidente cuyo fallo solo afecta la operación o no tiene efectos operacionales, no realizaremos acción preventiva alguna, al menos en las condiciones actuales.

Esto no significa que debamos olvidarnos del problema. Por el contrario, si sus consecuencias son importantes desde el punto de vista económico (costos muy elevados de reparaciones o pérdidas importantes de la producción), habremos de evaluar la posibilidad de un rediseño.

Rediseño

Entendemos por rediseño todo cambio en la especificación de un componente o adición de algún elemento nuevo o la sustitución de una máquina por otra de otra marca o tipo o el cambio de lugar de un equipo o cambios del proceso productivo o de los procedimientos que modifiquen el funcionamiento de la instalación.

Desde el punto de vista del mantenimiento de las instalaciones tendremos tres cuestiones principales a considerar:

- La relación entre la fiabilidad propia, inherente, de los equipos, en el contexto operacional real y la prestación deseada.
- La prioridad que otorguemos al mantenimiento frente al rediseño.
- El proceso de gestión de las modificaciones.

Fiabilidad propia y prestación deseada

La fiabilidad inherente o propia de un equipo está determinada por su diseño, fabricación y por el contexto operacional real. El mantenimiento no podrá incrementar la fiabilidad propia de los equipos, sino asegurarse de mantenerla en sus condiciones de diseño.

Por otra parte siempre estaremos frente a una prestación deseada; aquella que es necesaria para lograr la producción esperada o de diseño de toda la instalación productiva.

Si la fiabilidad inherente o capacidad propia del equipo, en el contexto operacional real, es superior a la prestación deseada, un mantenimiento apropiado logrará que tal prestación sea alcanzada.

En cambio si la fiabilidad inherente es inferior a la prestación deseada, no habrá mantenimiento alguno que logre alcanzar tal prestación. En estos casos será necesario alguna forma de rediseño, modificando el equipo o el contexto operacional o el proceso productivo, o si esto no es posible, al menos en lo inmediato, bajar las expectativas productivas al nivel de la fiabilidad propia del equipo.

Prioridad del mantenimiento frente al rediseño

Los párrafos anteriores sugieren claramente la interrelación existente entre la fiabilidad inherente, la prestación deseada y el mantenimiento de los equipos. Suele suceder que frente a dificultades para alcanzar la prestación deseada se pase a considerar directamente la posibilidad de un rediseño. Sin embargo debe tenerse presente que las modificaciones llevan tiempo y costos para su implantación. Además los operadores de operaciones y de mantenimiento habrán de interiorizarse en los nuevos equipos o en las modificaciones. Finalmente, los cambios pueden no otorgar los beneficios esperados.

Por todas estas razones siempre deben analizarse, en primer lugar, la fiabilidad inherente o capacidad propia de los equipos en su contexto real y las prestaciones deseadas, antes de pasar a considerar el rediseño.

Proceso de gestión de las modificaciones

Las modificaciones son normalmente costosas. Tendremos costos de ingeniería, modificaciones, equipos nuevos, desmontajes, montajes e instalaciones nuevas, costos productivos si se deben detener las instalaciones para efectuar los cambios, etc. Además puede ocurrir que los cambios no solucionen los problemas que les dieron origen y, más aún, generar nuevos problemas.

Por todo esto las modificaciones deben considerarse cuidadosamente y prestando atención a lo siguiente:

- Deberán justificarse económicamente.
- Deberán diseñarse adecuadamente por expertos en las disciplinas del diseño.
- Deberán realizarse los cambios, en campo, respetando los tiempos, costos y calidad de los trabajos.
- Interferir en la menor medida posible en la actividad productiva de la planta.

Consecuencias sobre la S. S. & M. A.

Hemos visto anteriormente que en los casos que un fallo funcional tenga consecuencias sobre la S. S. & M. A., y no encontremos una acción preventiva apropiada para reducir el riesgo del fallo al nivel tolerable o "cero", tenemos que, necesariamente, pasar al rediseño. Tal rediseño tendrá por objetivo alguno de los siguientes:

- Reducir o eliminar el riesgo de que se produzca el fallo funcional, sustituyendo el elemento en cuestión por otro más fiable o más resistente.
- Cambiar el elemento de modo que el fallo funcional ya no tenga consecuencias sobre la S. S. & M. A. Esto suele lograrse instalando uno o más de los cinco dispositivos de seguridad que ya vimos al analizar el tema Funciones y sus fallos.

Aquí debemos notar dos cuestiones. En primer lugar no hacemos mención a los costos. Si la situación es insegura debe corregirse, aunque no tenga una justificación económica. En segundo lugar, al agregar nuevos dispositivos, agregamos nuevas funciones y por lo tanto debemos considerar sus requerimientos de mantenimiento.

Fallos ocultos

Si la función es oculta y también su fallo funcional, el riesgo de un fallo múltiple puede reducirse de alguna de las siguientes formas:

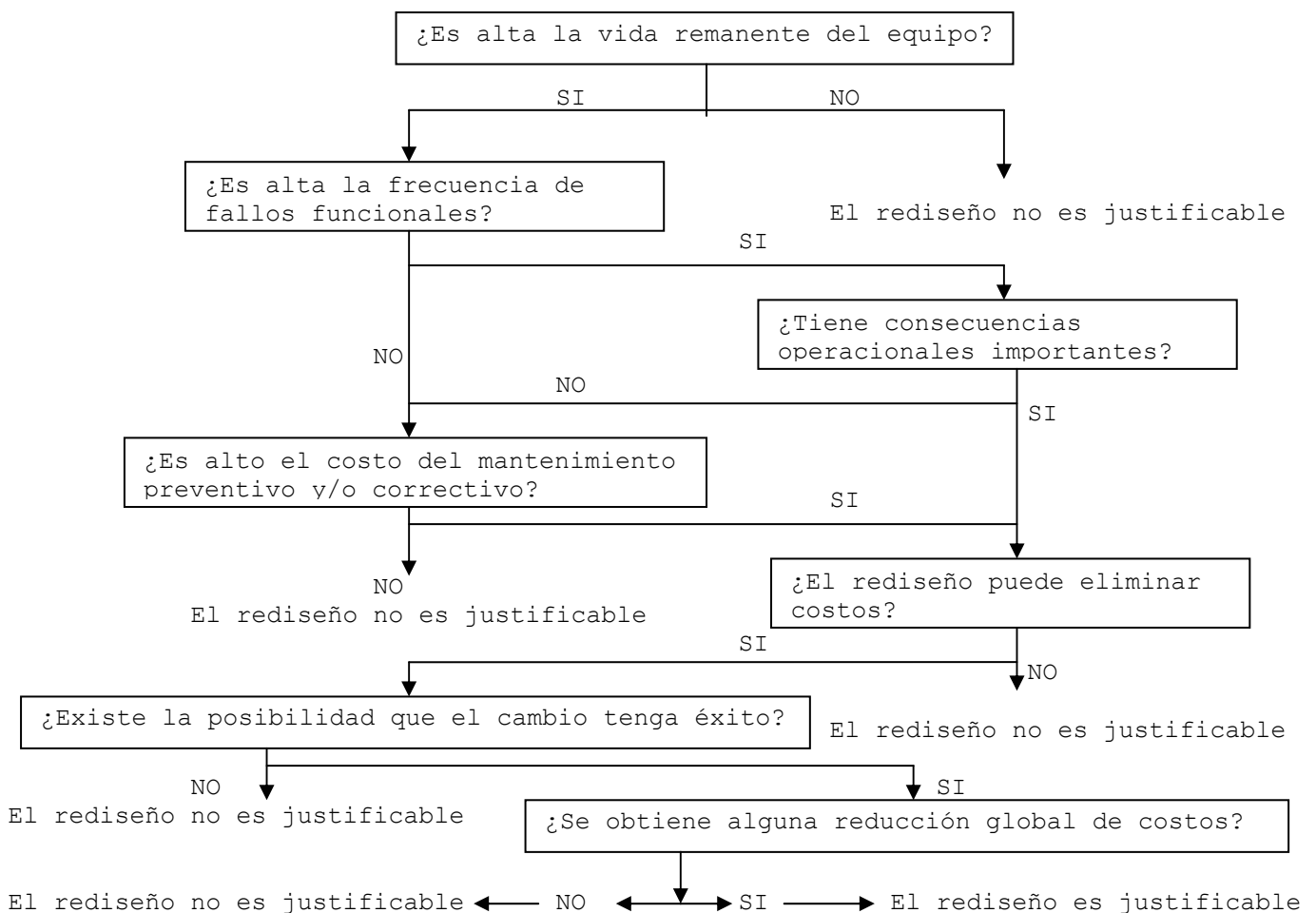
- Sustituyendo la función oculta por una evidente. Esto requerirá sustituir una función que no dispone de fiabilidad inherente, por una que si la tiene. Suele ser muy difícil encontrar este tipo de solución.
- Duplicando la función oculta (redundancia). En este tipo de soluciones lo que se logra es reducir la probabilidad de fallo múltiple significativamente. Tomemos el caso de una función cuya probabilidad de fallo sea de 1 en 10 y que posee un dispositivo de seguridad cuya probabilidad de fallo sea del 1% dentro de un determinado período de tiempo (por ej. Un año) . La probabilidad de fallo múltiple será de $0.1 \times 0.01 = 10^{-3}$. Si ahora agregamos un nuevo dispositivo del mismo tipo, la probabilidad del fallo múltiple; es decir que falle la función y los dos elementos de seguridad, simultáneamente, será $0.1 \times 0.01 \times 0.01 = 10^{-5}$.
- Sustituyendo la función oculta por otro dispositivo más fiable; es decir cuya probabilidad de fallo sea menor.
- Haciendo evidente la función oculta mediante el agregado de otro dispositivo. Como vimos anteriormente aquí también deben considerarse los requisitos de mantenimiento del nuevo dispositivo.

Consecuencias operacionales y no operacionales

Cuando el fallo solo tiene consecuencias operacionales o no operacionales, la primera opción, a falta de una acción preventiva eficaz, es no realizar mantenimiento preventivo alguno. Sin embargo puede resultar económicamente ventajoso realizar un rediseño, si con ello se puede conseguir:

- Reducir, o eliminar, los fallos funcionales. Esto suele lograrse mediante el reemplazo del elemento en cuestión por otro más fiable o resistente.
- Reducir o eliminar las consecuencias del fallo, por ejemplo instalando un equipo de reserva.
- Mejorando los costos y tiempos de las reparaciones, por ejemplo haciendo el equipo más fácilmente accesible.

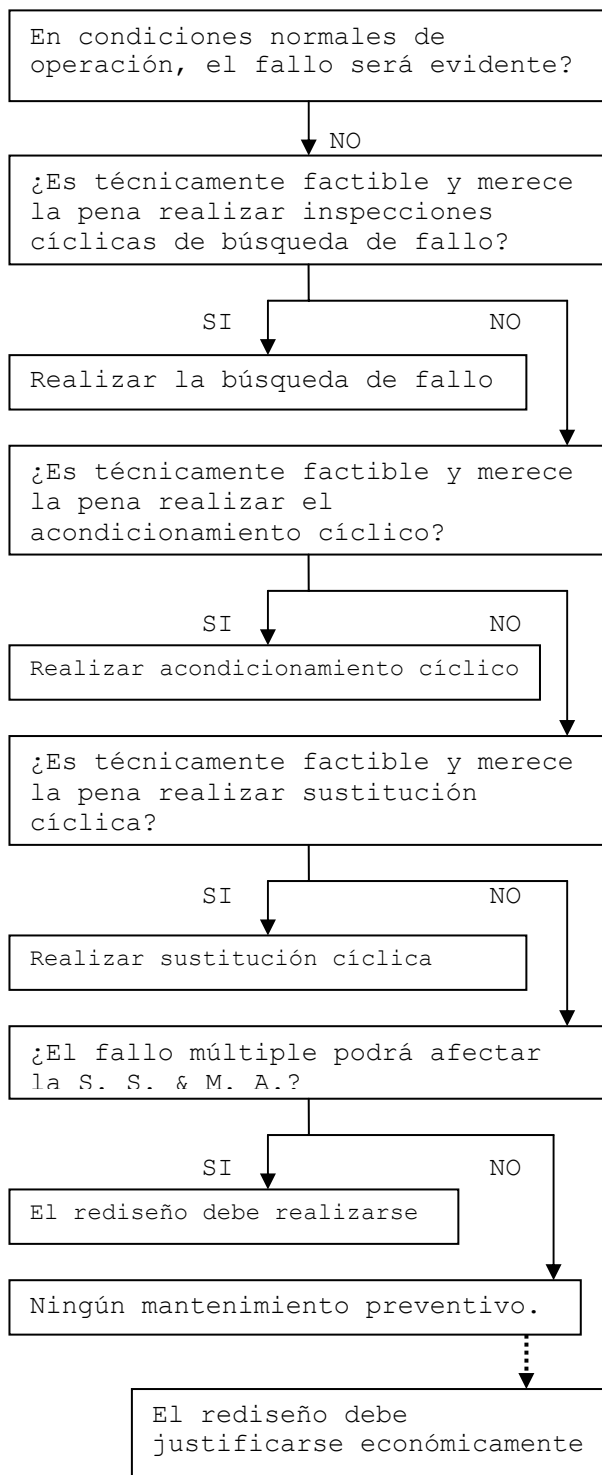
El denominador común de estos casos es que debemos justificar económicamente los cambios a realizar. El esquema siguiente muestra el proceso de decisión que aplica en estos casos:



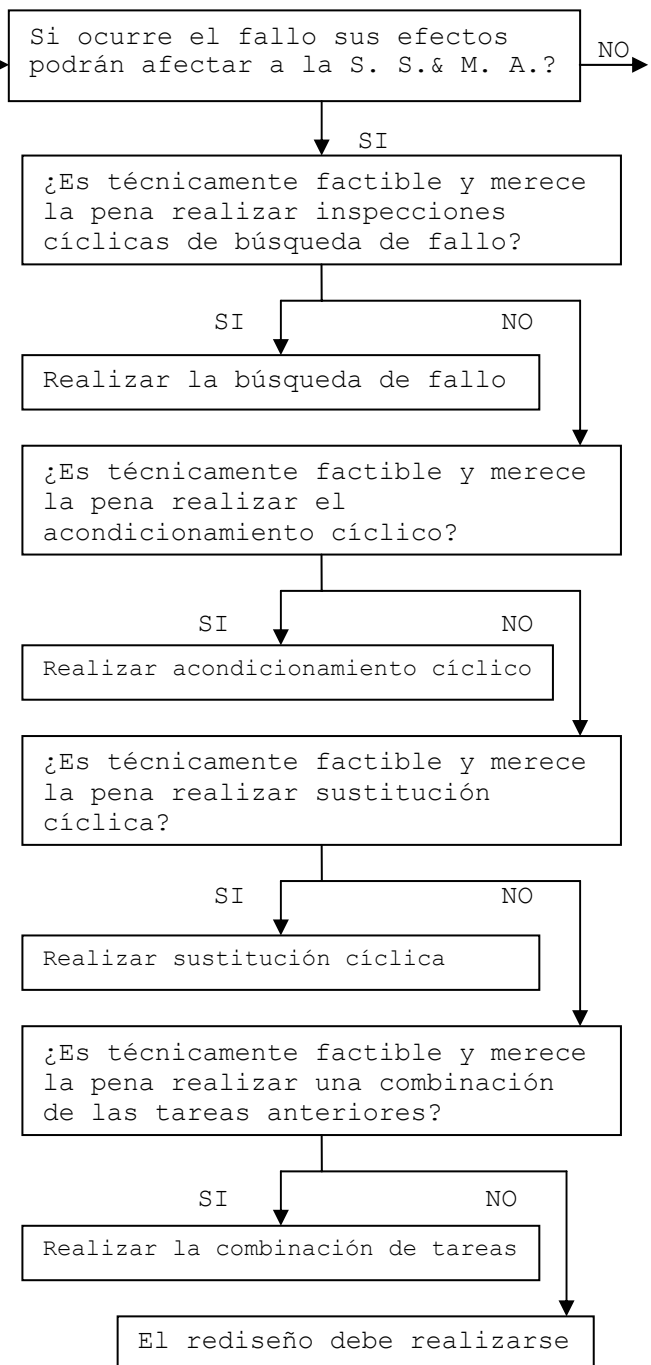
Estrategia de mantenimiento - Diagrama de decisiones

Consideremos ahora el diagrama de análisis de consecuencias y toma de decisión:

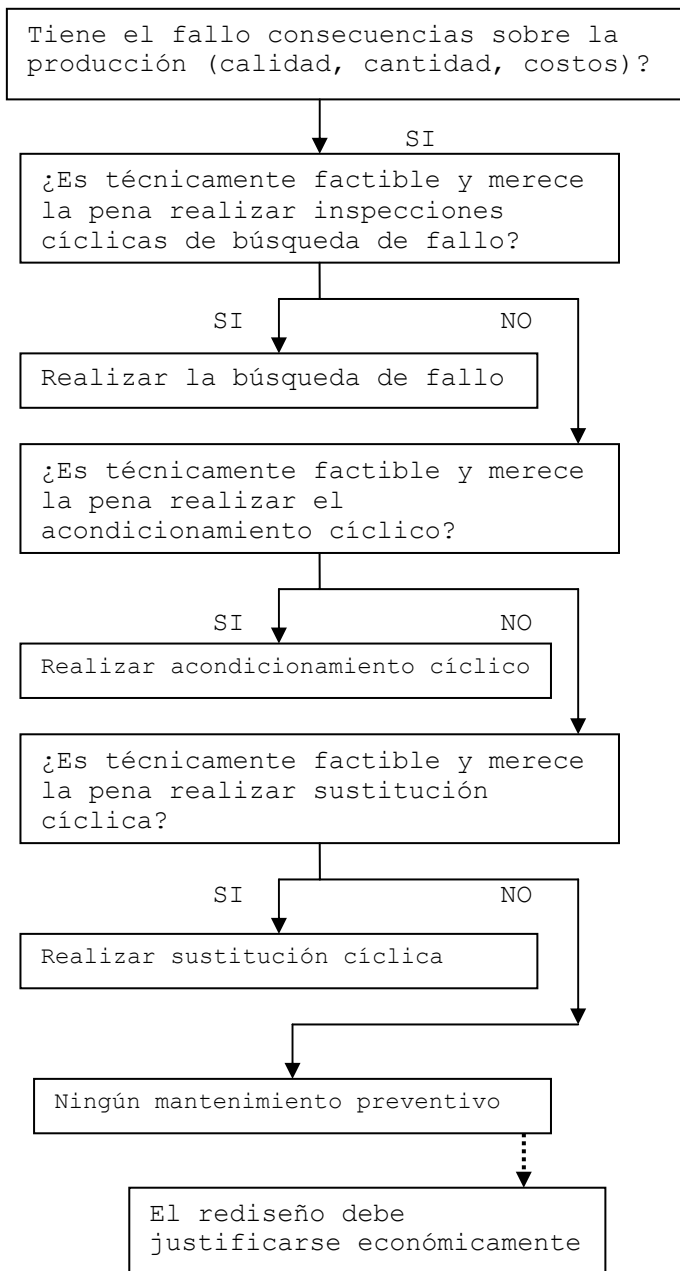
CONSECUENCIAS DEL FALLO OCULTO



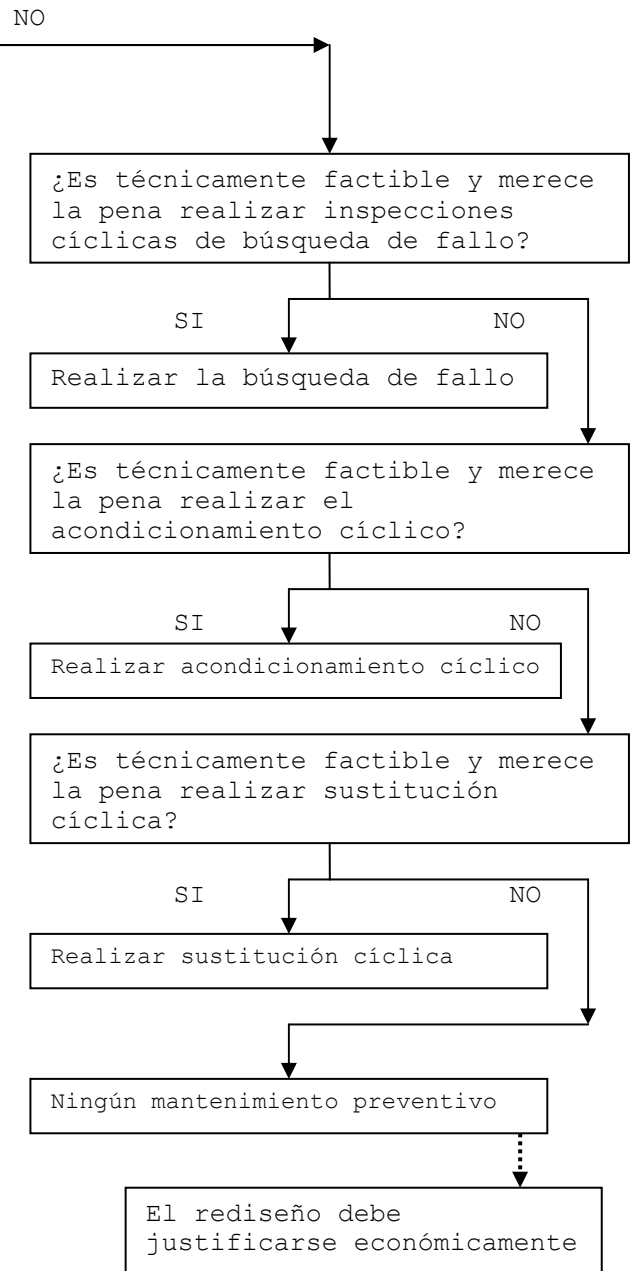
CONSECUENCIAS EN S. S. & M. A.



CONSECUENCIAS OPERACIONALES



CONSECUENCIAS NO OPERACIONALES



Monitoreo de condición (Condition Monitoring)

Hemos visto ya que, en la mayoría de los casos, antes que se produzca un fallo funcional, se tiene alguna advertencia de que tal fallo está comenzando a ocurrir. Denominamos fallo potencial, al momento en que tal advertencia se nos hace detectable, con los medios o instrumentos con que contamos para este fin.

Desde hace mucho tiempo se han utilizado los sentidos humanos (visión, audición, tacto y olfato) para detectar fallos potenciales. Sin embargo, hemos visto también que cuanto más anticipadamente podamos detectar tal advertencia, es decir cuanto mayor sea la distancia en el tiempo de P a F, tendremos dos ventajas:

- Mayor posibilidad de realizar correcciones que reduzcan la posibilidad o impidan el fallo funcional o disminuyan la importancia de sus consecuencias.
- Menor será la frecuencia de las inspecciones de búsqueda de fallo.

Por estas razones se han desarrollado, y continúan desarrollándose, nuevas técnicas para esta tarea, que hoy denominamos, genéricamente, "Condition Monitoring" o Monitoreo de Condición. Denominamos Mantenimiento a Condición al conjunto de tareas de mantenimiento que hace uso de estas técnicas, mediante inspecciones cíclicas, para la detección de fallos potenciales y a las tareas preventivas que reducen la probabilidad o eliminan el fallo funcional o reducen la importancia de sus consecuencias.

Podemos agrupar las tareas de monitoreo a condición, en las siguientes categorías:

- Efectos dinámicos, especialmente aplicables a equipos rotativos en los que las anomalías se manifiestan en forma de vibraciones, pulsaciones y efectos acústicos.
- Efectos de partícula, especialmente orientados a detectar fallos en los que hay desprendimiento de partículas, tales como el desgaste y abrasión metálicos.
- Efectos químicos, aplicable al caso de desprendimiento de sustancias o elementos químicos.
- Efectos físicos, en estado muy incipiente, tales como fisuras, grietas, roturas, desgastes, cambios dimensionales, deformaciones geométricas, etc.
- Efectos de temperatura, orientados a detectar las alteraciones de la temperatura normal de funcionamiento, en lugares específicos de los equipos; tales como: rodamientos, cojinetes, superficies metálicas de envolventes de hornos, calderas.
- Corrosión. Este es una forma de efecto químico, que puede ser considerado como una causa o modo de fallo y también como un efecto de un fallo. Aunque es un efecto químico, se la considera separadamente dado la gran cantidad de situaciones en las que se presenta y sus características muy específicas.

Efectos dinámicos

El análisis completo de estos temas es materia de una especialización. Solamente haremos un resumen de las técnicas más comunes:

Vibraciones

- ✓ **Análisis de vibración en banda ancha:** Se analizan los cambios en las frecuencias vibracionales, debidos a desgastes, fatiga corrosión, desalineamientos, aflojamiento de los anclajes, ensuciamiento, etc., especialmente en máquinas rotativas tales como motores, bombas, turbinas, compresores rotativos, cajas de engranajes, etc. Solo nos permite una medición general del equipo y tiene limitadas posibilidades de análisis de los fallos potenciales.
- ✓ **Análisis de banda octava:** Es muy similar al de banda ancha solo que permite filtrar las frecuencias por octavas lo que otorga una ligera mejoría en el análisis de fallos potenciales.
- ✓ **Análisis de banda estrecha de ancho constante:** Similar a los casos anteriores pero con la ventaja de permitir seleccionar los rangos de frecuencias permitiendo analizar armónicas múltiples y bandas laterales. Permite análisis más específicos.
- ✓ **Análisis de banda estrecha de porcentaje constante:** Muy similar al anterior, con la posibilidad de analizar anchos de banda muy finos lo que otorga una resolución muy precisa, especialmente en el rango de bajas frecuencias.
- ✓ **Análisis de tiempo real:** Analiza señales vibracionales y acústicas transitorias (no continuas); tales como perturbaciones y choques. Las señales se registran en cinta magnética y luego se pueden analizar a la velocidad real o en velocidad lenta, fuera de línea.

- ✓ **Análisis de proximidad:** Especialmente indicado para analizar desbalanceos, desalineaciones, turbulencias, roces de partes metálicas, etc.
- ✓ **Análisis de impulsos de choque:** Analiza específicamente las señales de choque o perturbaciones transitorias y está especialmente indicado para el monitoreo de rodamientos, válvulas de motores alternativos, herramientas neumáticas de impacto, etc.
- ✓ **Análisis de curtos:** Es también un análisis específico de impulsos de choque, de aplicación muy limitada, como es el caso de rodamientos de rodillos.

Emisión acústica

Esta es una de las técnicas de análisis más modernas, de fallos potenciales internos en estructuras, recipientes y cañerías. Básicamente analiza las emisiones acústicas que se producen en el interior de las paredes metálicas, cuando se aplican cargas, o descargas, para verificar la existencia de deformaciones plásticas o grietas o fisuras internas. La presencia de tales fallos está asociada a efectos de fatiga, corrosión, desgaste, esfuerzos mecánicos y reacciones químicas que se producen en el interior de la estructura granular de los metales. Esta técnica es también utilizada en excavaciones subterráneas para analizar posibles fallos en la masa rocosa de las paredes.

Monitoreo de partículas

- ✓ **Ferrografía:** Especialmente dirigido al análisis de presencia de partículas metálicas en fluidos lubricantes de sistemas cerrados, producidas por desgaste. Básicamente consiste en separar las partículas sobre una placa magnética inclinada sobre la que se hace pasar la muestra del lubricante en estudio. Las partículas se agrupan en función a su tamaño. Un análisis posterior (tamaño, forma, densidad, etc) permite diagnosticar sobre la magnitud del desgaste y la causa del fallo.
- ✓ **Detección de virutas magnéticas:** Orientada a uso similar que la Ferrografía. Se coloca un tapón magnético en contacto con el flujo del lubricante. Las partículas metálicas que tienen susceptibilidad magnética son atrapadas en el tapón, el que es retirado con cierta frecuencia y se analizan las partículas retenidas. Un análisis posterior (tamaño, forma, densidad, etc) permite diagnosticar sobre la magnitud del desgaste y la causa del fallo.
- ✓ **Fluorescencia de rayos X:** Esta técnica se utiliza para detectar presencia de elementos químicos metálicos y también algunos aniones, contenidos en una muestra de fluido lubricante. La naturaleza de los contaminantes permite diagnosticar el tipo de desgaste que se está produciendo.
- ✓ **Filtración por tamaños:** Una muestra del aceite lubricante es filtrada en una serie de filtros que retienen diferentes tamaños de partículas. Luego se analizan por microscopia, las diferentes fracciones y se grafica la distribución de tamaños. El análisis estadístico de estos gráficos permite establecer si se está produciendo algún desgaste anormal.
- ✓ **Prueba de mancha:** una muestra del lubricante es colocada en un papel de filtro. El aceite se extiende en forma de mancha ascendente arrastrando las partículas metálicas que pueda contener. Se forman anillos clasificados por su tamaño. Como en el caso de la filtración por tamaños, el análisis de la mancha formada permite establecer si se está produciendo algún desgaste anormal.

Monitoreo químico

Básicamente consiste en la determinación de presencia de elementos químicos.

Se destacan los siguientes tipos de ensayos: absorción y emisión atómica, cromatografía de gases y de líquidos, espectroscopia en los rangos de infra-rojo, fluorescencia, visibles y ultra-violeta.

Análisis de aceites lubricantes de circuitos cerrados, por espectrometría. Estas técnicas permiten la búsqueda de las siguientes categorías de fallos:

- ✓ **Desgastes:** En este caso se determinan componentes metálicos propios de las máquinas, tales como: hierro, cromo, plomo, cobre, aluminio, molibdeno, estaño, plata, zinc, níquel, etc.
- ✓ **Contaminaciones:** Se miden elementos contaminantes que puedan presentarse debido a fugas, tales como: siliconas, sodio, cobre, boro, etc.
- ✓ **Corrosión:** En estos casos se intenta determinar la presencia de óxidos metálicos. Los contaminantes se miden en muestras de aceite lubricante de circuitos cerrados después de un cierto tiempo de uso.

- La espectrometría de emisión atómica utiliza la propiedad de las impurezas metálicas de emitir radiaciones características cuando son excitadas con corrientes continuas de alto voltaje (unos 15.000 v).
- La absorción atómica aprovecha la propiedad de los elementos de absorber una longitud de onda específica, de una fuente de luz apropiada, cuando son vaporizados en una llama de alta temperatura (v.gr. acetileno).
- La cromatografía de gases permite la detección de fugas de gases aprovechando la propiedad de algunos materiales absorbentes (diatomeas) finamente divididos. Los gases en estudio se absorben en forma selectiva cuando son obligados a pasar por una columna de tales materiales. Los gases así separados son posteriormente extraídos mediante el paso de un gas portador inerte.
- La cromatografía de líquidos obedece al mismo principio. La muestra líquida (aceite lubricante) es obligada a pasar a través de una columna de material absorbente selectivo. Las partes así separadas son posteriormente extraídas mediante el uso de solventes apropiados.
- En la espectroscopia se aprovecha el resultado de irradiar a las sustancias cuya presencia desea estudiarse, con fuentes de luces apropiadas.
- En el caso de la espectrometría de infra-rojo, se analizan las bandas de absorción; es decir las longitudes de onda absorbidas por el elemento en estudio.
- En la espectroscopia visible y ultra-violeta, se analiza el espectro de longitud de onda producido que es característico de cada elemento.
- En la espectroscopia de fluorescencia, la muestra es irradiada por y los productos de degradación dan espectros luminiscente, fluorescente o fosforescente que es característico de las sustancias producidas en la irradiación, de acuerdo a la estructura molecular.

Monitoreo de efectos físicos

Muchos, y cada vez más, son los efectos físicos que se aprovechan para la detección de diferentes tipos de fallos; por ejemplo: tintas penetrantes, tintas penetrantes electrostáticas, partículas magnéticas, películas magnéticas, ecos de impulsos ultrasónicos, corrientes de Foucault, radiografía y gammagrafía, fluoroscopia de rayos X, boroscopia, sondas de luz fría, endoscopia, fibroscopia panorámica, fractografía electrónica.

- Tintas penetrantes se utilizan para descubrir fisuras superficiales invisibles a la inspección ocular. La tinta que ha penetrado en la fisura se hace visible mediante una sustancia reveladora apropiada.
- La tinta penetrante fluorescente electrostática requiere de la aplicación de una carga electrostática opuesta para su visualización.
- En la aplicación de partículas magnéticas se realiza una magnetización previa de la pieza en estudio y luego se pulveriza un solvente que tiene en dispersión partículas muy finas de hierro. Si existe alguna fisura las partículas serán atraídas por la distorsión del campo magnético, producida por la fisura.
- En el caso de película magnética, se hace uso del mismo principio que el de partículas magnéticas. Se construye una película de goma silicona mediante una solución que contiene partículas de hierro finamente divididas. La pieza en estudio es magnetizada con un campo magnético inductor. Las partículas de hierro migran hacia los bordes de la fisura, si la hay, y cuando la película ha curado se despega, quedando en ella una imagen de la fisura, que puede ser luego observada con microscopio o a simple vista dependiendo de la magnitud de la misma.
- En el caso de ecos de impulsos de ultrasonido, se envían impulsos ultrasónicos, mediante un transmisor aplicado sobre la superficie de la pieza que se ensaya. Los ecos de tales impulsos, que se producen en la cara opuesta de la pieza o en las discontinuidades internas, son recibidos y amplificadas para su estudio. El tiempo transcurrido desde que se envía la señal hasta que se obtiene sus ecos y la magnitud de los mismos permite establecer la ubicación de las discontinuidades y su magnitud.
- En la transmisión ultrasónica, se aplican ondas continuas, mediante un transmisor colocado en un extremo de la pieza y en el otro extremo se recibe dicha señal. Las reducciones de energía que llega al receptor permite analizar las discontinuidades existentes.
- En la resonancia ultrasónica, el transmisor se mueve a lo largo de la pieza. La resonancia interna de la pieza da por resultado una señal de recepción muy alta. Las discontinuidades internas causan que, en el receptor, la señal se reduzca o desaparezca.

- En modulación de frecuencia ultrasónica, mediante un transductor se envían ondas ultrasónicas de frecuencias continuamente cambiantes. Si hay discontinuidades, se producen ecos en la frecuencia inicial que interrumpen a la frecuencia modificada. Midiendo la fase entre las frecuencias (eco y modificada) se puede determinar la situación de la fisura.
- Detección de fugas por medios ultrasónicas. Las fugas gaseosas de alta velocidad generan frecuencias ultrasónicas por los choques moleculares que se producen al pasar el gas por un orificio muy pequeño. Mediante micrófono cerámico de alta frecuencia pueden detectarse y determinarse su ubicación.
- El fenómeno de Foucault es utilizado mediante la aplicación de una bobina de prueba alimentada con corrientes alternas de alta frecuencia (entre 100 KHz y 4Mhz), que producen las corrientes parásitas (corrientes de Foucault) sobre la superficie de la pieza en estudio. Estas corrientes son alteradas (desviadas, comprimidas, demoradas y debilitadas) por las discontinuidades externas o internas. Esto produce reacciones, en la bobina de prueba, que pueden ser amplificadas y registradas para su análisis.
- El mismo principio de impresión sobre placas sensibles que es utilizada para la detección de fracturas óseas u otras afecciones médicas, es utilizado, mediante la aplicación de radiaciones X o Gamma, a través de cuerpos metálicos. Las discontinuidades son observadas como zonas oscuras en las placas sensibles a la radiación.
- La fluoroscopia radiográfica de rayos X utiliza el mismo principio, pero en lugar de placas sensibles se utilizan pantallas revestidas fluorescentes ante la radiación. Aquí también las discontinuidades se presentan como zonas más oscuras.
- En la boroscopia un haz muy intenso de luz es transmitido a través de largas fibras ópticas que permiten observar el interior de tubos estrechos u otros lugares internos de máquinas y equipos. Las imágenes pueden ser inspeccionadas en forma directa o mediante fotografías.
- Sondas de luz fría. Similar al caso anterior, solo que con un intenso haz de luz fría que se transmite mediante un cable flexible de fibra óptica y su reflexión es recibida en un boroscopio. Las sondas tienen diámetros de tan solo 2 a 10 mm. Las imágenes pueden ser vistas desde un monitor de campo o fotografiarse para su posterior análisis. La particularidad es que se canaliza el haz de luz muy definidamente y no se genera calor interno.
- La endoscopia de sonda profunda es similar a la boroscopia de luz fría pero las sondas pueden tener hasta 21 m de longitud. La iluminación se obtiene de luz alógena de cuarzo de gran intensidad.
- En los fibroscopios de vista panorámica, el haz de luz fría de alta intensidad se transmite hasta un fibroscopio de fibras ópticas flexibles y posee un prisma de control remoto en su extremo de modo que puede inspeccionar hacia delante y hacia los costados con gran versatilidad. Como en los casos anteriores las imágenes pueden ser vistas mediante un monitor de TV o tomarse fotografías. También puede utilizar una fuente de luz ultravioleta de gran intensidad lo que le permite inspeccionar pequeñas imperfecciones en áreas muy inaccesibles.
- Fractografía electrónica. Mediante el uso de réplicas superficiales, y el análisis con microscopio electrónico es posible analizar micro fisuras y determinar las causas y circunstancias del fallo que las produjo. El proceso de replicado de superficies consta básicamente de una etapa inicial de preparación de la superficie, que es esencial para el éxito del estudio y una posterior replicación mediante filmes o esmaltes apropiados.

Monitoreo de la temperatura

- La termografía consiste en hacer visible un rango de temperaturas, normalmente invisible a la vista humana, de la banda de ondas infra-rojas. Esencialmente se parte del hecho que todos los cuerpos emiten radiaciones infra-rojas aún a temperaturas tan bajas como -273°C ; es decir el cero absoluto. La energía así emitida es captada por una cámara de infra-rojos que puede ser mostrada en pantalla visual o grabada en cinta de video para su posterior análisis. Las diferentes temperaturas son mostradas en forma de bandas de colores. El equipo detecta la energía emitida a distancia sin necesidad de tomar contacto con el cuerpo y sin el riesgo de distorsionar su temperatura.
- El monitoreo de temperatura también puede realizarse con termocuplas de contacto o termo resistencias. Estos dispositivos, convenientemente elegidos para el rango de temperatura que desea analizarse, entregan información continua o mediante inspecciones frecuentes.

Monitoreo de la corrosión

- Polarización lineal. En circuitos cerrados o de funcionamiento continuo donde el fluido es agua u otra sustancia corrosiva, se mide la corrosión mediante el método de la polarización electroquímica, con dos o tres sondas y un instrumento medidor. Básicamente consiste en el hecho que aplicando un pequeño voltaje entre una sonda y el fluido corrosivo, se produce una corriente eléctrica cuya medida es directamente proporcional al nivel de corrosión que está ocurriendo e inversamente proporcional al voltaje aplicado, de modo que puede medirse en forma fácil y muy precisa el grado o nivel de corrosión que se está produciendo.
- Resistencia eléctrica. En este caso lo que se mide es la corrosión total que sucede en un período de tiempo determinado. Básicamente consiste en medir la resistencia eléctrica de una sonda (mediante un puente eléctrico de balance), del mismo metal que la instalación que desea analizarse. La resistencia eléctrica de la sonda se incrementa en la medida que la corrosión hace disminuir su sección transversal. De esta manera se mide la corrosión total ocurrida.
- Monitoreo de potencial de corrosión. Esta es una técnica termodinámica, bastante sofisticada y de muy poco uso. Tiene la ventaja que permite medir el potencial de corrosión de metales nobles como el acero inoxidable.
- Prueba de testigos. Esta es una técnica muy simple, aunque entraña ciertos riesgos. Básicamente consiste en colocar pequeños cupones o testigos del mismo material del equipo que se desea analizar. Al cabo de cierto tiempo se extraen los testigos y se mide la corrosión o pérdida de peso metálico y la forma en que ésta sucede (uniforme, picadura, etc). Con estos valores se determina el grado de corrosión del equipo bajo control. Por su sencillez es muy utilizado en equipos sometidos a fluidos o sustancias corrosivas y también como método de control de sistemas de protección anticorrosivos (corriente impresa, ánodos de sacrificio, pinturas, etc).

Introducción al análisis de vibraciones

Toda vibración es un movimiento oscilatorio periódico. Consideremos una partícula P que cuando está en reposo se encuentra en el eje X-X, ver figura 12, y que es impulsada por una fuerza externa que la obliga a realizar un movimiento vibratorio. Por ahora hagamos abstracción de la fuerza y su origen. Estudiemos el movimiento de la partícula desde un punto de vista cinético. La partícula se moverá hacia arriba y hacia abajo del eje X, alcanzando los valores máximos de desplazamiento $+D$ y $-D$. Para que este movimiento oscilatorio sea una vibración debe darse la condición de que el tiempo T requerido para realizar un ciclo completo (4 veces el desplazamiento D), sea siempre el mismo. Este tiempo T será el período de oscilación. Llamaremos frecuencia de la oscilación al valor : $f = 1/T$, es decir la cantidad de veces que la partícula realiza el ciclo completo en la unidad de tiempo, habitualmente 1 min. La frecuencia se medirá en cpm (ciclos por minuto) o rpm (revoluciones por minuto).

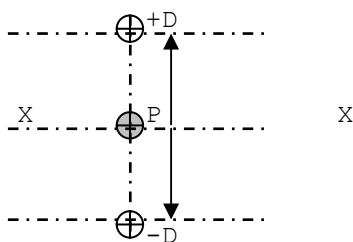


Figura 12.

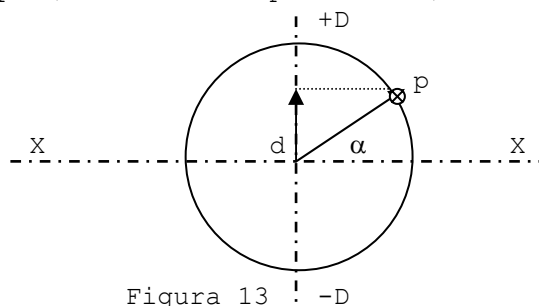


Figura 13

En este tipo de movimiento podremos destacar tres variables:

- d = desplazamiento,
- v = velocidad,
- a = aceleración.

El desplazamiento es la medida del alejamiento de la partícula respecto de su posición de reposo, sobre el eje X. Este desplazamiento alcanza el valor máximo de alejamiento ($+D$ y $-D$), respecto del eje X. A este valor D le denominaremos amplitud máxima de la oscilación o simplemente amplitud. La unidad de medida es, habitualmente en micrones (10^{-3} mm)

La partícula P se mueve de tal forma que adquiere su mayor velocidad cuando pasa por el eje X y se detiene al llegar a los valores máximos del desplazamiento ($+D$ y $-D$).

Al valor máximo de velocidad V , le llamaremos amplitud de velocidad. La velocidad cumplirá ciclos alternando los valores máximos y mínimos con la misma frecuencia que el desplazamiento.

Puesto que la velocidad es variable, pasando de valores máximos a cero, cíclicamente, se producirán aceleraciones. La aceleración, a , tomará sus valores máximos A , en los extremos del desplazamiento y será cero sobre el eje x , cuando la velocidad alcanza su valor máximo. De este modo la aceleración pasará de valores máximos a cero, cíclicamente, con la misma frecuencia que el desplazamiento y la velocidad.

De todo esto se deduce que para la completa definición de un movimiento vibratorio será necesario evaluar tres variables: desplazamiento d , velocidad v y aceleración a . A su vez estas variables tendrán dos parámetros clave: amplitud y frecuencia.

La figura 12 es una representación gráfica unidimensional del movimiento vibratorio. En ella representamos el desplazamiento sobre el eje perpendicular al X y el tiempo es una variable implícita.

Podemos intentar una mejor representación, bidimensional, logrando que el tiempo sea una variable explícita. Para ello consideremos el gráfico de la Figura 13.

Podemos imaginar la trayectoria de la partícula P , como la proyección paralela de un punto "p" que recorra una trayectoria circular a una velocidad angular " w " constante y de radio igual a D .

Podemos ver fácilmente que el desplazamiento $d = D \sin \alpha$ (ángulo medido en radianes) y la velocidad angular, que es constante, $w = \alpha/t = 2\pi/T$; donde t = tiempo de recorrido del ángulo α y T = período, es decir tiempo de recorrido de una vuelta completa o sea 2π . La velocidad angular $w = 2\pi/T = 2\pi f$ (ya dijimos que $f = 1/T$). El ángulo $\alpha = 2\pi t / T = 2\pi f t$

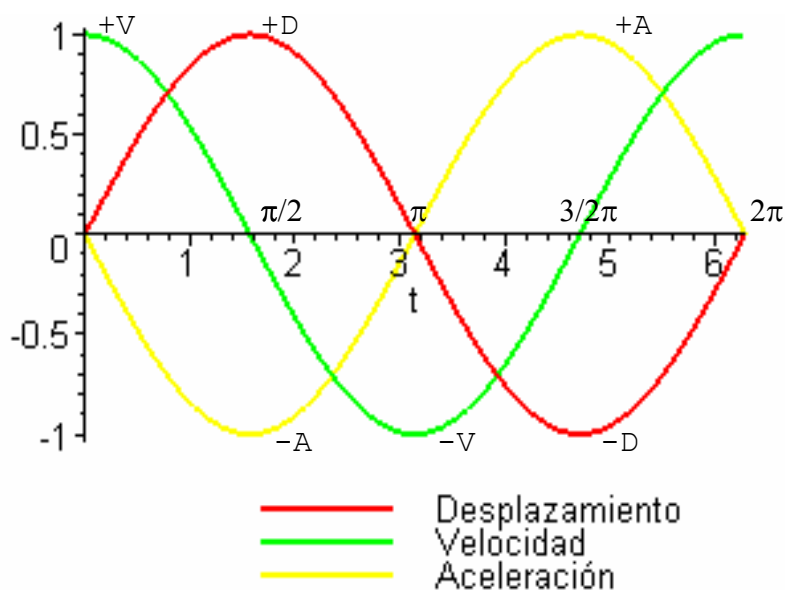
Entonces:

$$d = D \sin \alpha = D \sin (2\pi f t);$$

$$v = \frac{\partial d}{\partial t} = D 2\pi f \cos(2\pi f t); \text{ donde } V = D 2\pi f; \text{ entonces } v = V \cos(2\pi f t)$$

$$a = \frac{\partial v}{\partial t} = -D(2\pi f)^2 \sin(2\pi f t); \text{ donde } A = D(2\pi f)^2; \text{ entonces } a = -A \sin(2\pi f t).$$

La Figura 14 nos da la representación gráfica de estas ecuaciones:



Podemos destacar aquí el concepto de fase: es la posición temporal relativa, respecto de una posición tomada como referencia. Por ejemplo la diferencia de fase entre la velocidad y el desplazamiento es $\pi/2$; ya que esta es la distancia, en el tiempo, entre las posiciones consecutivas de sus ceros o valores máximos. Entre la aceleración y el desplazamiento la diferencia de fase es de π ; ya que la distancia entre sus ceros o máximos consecutivos es de π .

Medición de vibraciones

Toda máquina que posee partes en movimiento, especialmente las rotativas, darán lugar a vibraciones. Las fuerzas centrífugas, alternativas y fricciones o rozamientos de las partes en movimiento generarán vibraciones, que se manifestarán principalmente en los vínculos o apoyos tales como cojinetes, rodamientos, anclajes.

En una pieza rotativa, para que no existan fuerzas que generen vibraciones, el eje de giro debería pasar por el centro de gravedad y ser coincidente con el eje principal de inercia. Dada la imposibilidad de construir piezas mecánicas absolutamente perfectas, no solo en su geometría sino también en la distribución de su masa, siempre habrá un cierto nivel de vibraciones, que habremos de considerar como propias del funcionamiento "normal" del equipo.

En el apartado anterior hemos visto la forma de representar gráfica y analíticamente las ecuaciones de un movimiento vibratorio, al que podremos llamar una armónica pura. En la práctica siempre estaremos en presencia de varias componentes vibratorias, lo que dará lugar a una poliarmónica.

El análisis vibratorio, como técnica del monitoreo de condición se basa en que cada componente o cada tipo de deficiencia mecánica generará una vibración de frecuencia específica que, en condiciones de funcionamiento normal alcanza una amplitud máxima determinada.

Esto permite:

1. Midiendo la frecuencia, identificar el origen de una vibración.
2. Midiendo su amplitud y comparándola con la amplitud propia del funcionamiento normal, evaluar su estado, determinando si corresponde a un funcionamiento normal o al inicio de un fallo.

Estos dos parámetros clave (frecuencia y amplitud) pueden ser complementados por la medición de dirección y fase, que permitirán una mejor definición del origen de un fallo.

El análisis vibratorio permite detectar alguno de los siguientes tipos de fallos:

- ✓ Rodamientos deteriorados,
- ✓ Engranajes defectuosos,
- ✓ Acoplamientos desalineados,
- ✓ Rotores desbalanceados,
- ✓ Vínculos o anclajes flojos o desajustados,
- ✓ Ejes deformados,
- ✓ Lubricación deficiente,
- ✓ Exceso de huelgo de cojinetes,
- ✓ Pérdida de rigidez,
- ✓ Problemas aerodinámicos o hidráulicos o turbulencias,
- ✓ Barras cortadas en rotores jaula de ardilla.
- ✓ Etc. Etc.

Ya vimos que, en general, estaremos en presencia de poliarmónicas, es decir la suma de varias componentes. Podemos distinguir dos grandes categorías, acotados por el valor de la frecuencia en relación a la frecuencia de rotación del eje móvil. Así tendremos: componentes de baja frecuencia, cuando los valores estén en valores de hasta 5 veces la velocidad de rotación del eje y alta frecuencia cuando exceda este valor. Si bien este límite es aproximado y solo orientativo.

Como regla general podemos decir que la velocidad V de un movimiento vibratorio es significativa en ambos baja y alta frecuencia. En cambio los valores de desplazamiento D , tendrán especial significado en las componentes de baja frecuencia y los valores de la aceleración A serán significativos en los componentes de altas frecuencias.

Siempre en términos generales puede decirse que el método de trabajo se reduce a las siguientes etapas:

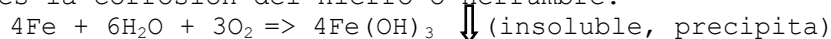
1. Para una primera evaluación de una máquina, será necesario medir la componente velocidad, aún cuando se trate de una vibración poliarmónica, que es lo habitual. Si el valor de velocidad es más alto que el correspondiente al funcionamiento normal entonces habrá que determinar si la componente que origina la alta velocidad es de baja o alta frecuencia.
2. En el primer caso nos indicará que se trata de un desbalanceo, desalineación, deformación del eje, falta de rigidez o aflojamiento de los anclajes, huelgo excesivo en cojinetes, correas flojas, etc.
3. En cambio si se trata de una componente de alta frecuencia, entonces estaremos en presencia de falla en rodamientos, engranajes defectuosos, deficiencias de lubricación, cavitación o turbulencias, etc.

Introducción a la corrosión

La corrosión química puede ser vista a través del análisis de reacciones químicas sencillas. La forma más común de la corrosión se presenta cuando los metales están en presencia de agua dulce o salina o en medios alcalinos. Pero se requiere de la

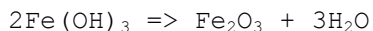
presencia del oxígeno para que la corrosión sea significativa. En cambio en los medios ácidos la corrosión aparece de forma mucho más activa. Vemos algunas reacciones típicas de la corrosión:

En medios neutros o alcalinos: Las soluciones acuosas disuelven oxígeno del aire. La forma más común es la corrosión del hierro o herrumbre:

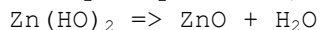
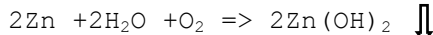


Como se muestra en esta ecuación el hierro en presencia de agua y oxígeno se oxida a la condición de hidróxido férrico, sustancia insoluble de color rojiza.

Si esta reacción se produce en la atmósfera y se da la condición de secado de este hidróxido, se tendrá la forma más habitual del herrumbre u óxido férrico:

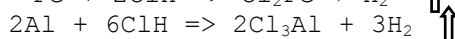
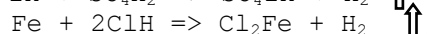
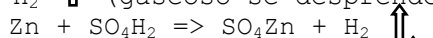


Reacciones de oxidación similares ocurren con otros metales, por ejemplo:

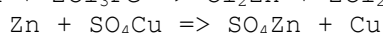
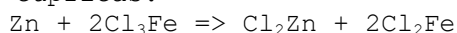


Esta forma de oxidación / corrosión puede verse en los materiales galvanizados (chapa canaleta de techos), en forma de depósito de color blanquecino.

En medios ácidos: La corrosión es aquí una reacción mucho más activa, no requiere de la presencia del oxígeno y normalmente se produce con desprendimiento de hidrógeno gaseoso:



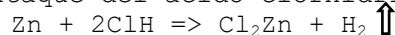
Corrosión en medios oxidantes que no contienen ni oxígeno ni ácidos: Las soluciones acuosas con sustancias oxidantes también atacan en forma de corrosión a los metales; por ejemplo sales férricas o cúpricas:



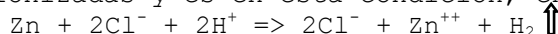
En el primer caso el cloruro férrico actúa como oxidante frente al Zn, reduciéndose a la condición de cloruro ferroso. En el segundo caso se oxida el Zn a la vez que se reduce el Cu. Este último tipo de reacción suele denominarse desplazamiento de metales.

La corrosión electroquímica, que es una de las formas más comunes de la corrosión, es así definida cuando se trata de reacciones en las que está involucrada la transferencia de electrones. Resulta así evidente que, habiendo intercambio de electrones, nos enfrentamos a reacciones de óxido-reducción.

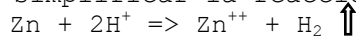
Reconsideremos la reacción de ataque del ácido clorhídrico al metal cinc:



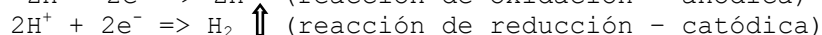
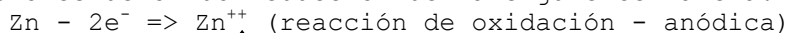
Esta es una forma simplificada de la reacción, ya que en soluciones acuosas estas sustancias se encuentran ionizadas y es en esta condición, en la que reaccionan:



De esta forma resulta obvio que solamente cinc e hidrógeno participan activamente de la reacción; es decir, podríamos simplificar la reacción de la siguiente manera:



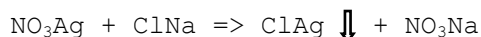
Es decir, que la corrosión del cinc por el ácido clorhídrico es en realidad una reacción entre el cinc y los iones hidrógeno para producir iones cinc y hidrógeno molecular gaseoso. En otras palabras consiste en la oxidación del cinc, que pasa a su estado iónico por pérdida de dos electrones y la reducción de los iones hidrógeno, que ganando dos electrones pasan a formar la molécula del gas. Podemos por lo tanto escribir las reacciones de óxido-reducción de la siguiente manera:



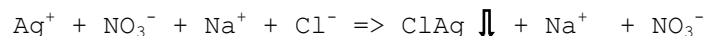
En la terminología de la corrosión, a las reacciones de oxidación se las denomina anódicas y a las de reducción, catódicas.

En la corrosión las reacciones ocurren de la manera aquí expresada y habitualmente ambas reacciones ocurren en lugares diferentes, más o menos alejadas entre si, pero siempre a través de medios conductores a la transferencia de electrones y medios acuosos donde se mueven los iones.

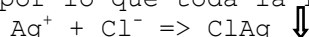
Con propósito comparativo, veamos el caso de una reacción que no es electroquímica, por ejemplo:



Como en el caso anterior estas sustancias, en medio acuoso, también están ionizadas, con lo que la ecuación podría escribirse de la siguiente forma:

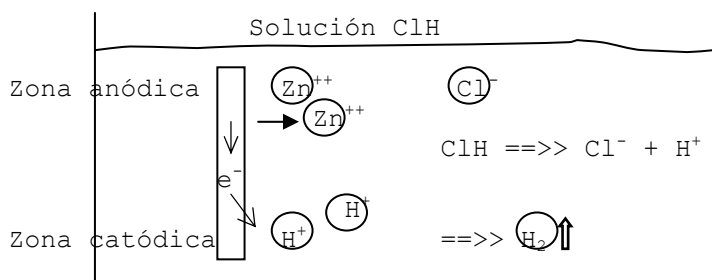


Resulta evidente que aquí solo participan de la reacción los iones Ag^+ y Cl^- que se combinan para dar ClAg que es poco soluble y por lo tanto precipita. Los iones NO_3^- y Na^+ no participan de la reacción, por lo que toda la reacción se reduce a:



Esto nos indica claramente que aquí no hay ganancia ni pérdida de electrones, es decir, no estamos en presencia de óxido / reducción ni reacciones anódicas y catódicas como en el caso anterior.

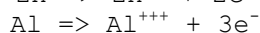
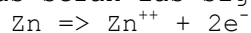
Las reacciones de corrosión de los metales son, habitualmente, electroquímicas y por lo tanto estaremos en presencia de reacciones anódicas (oxidación) y catódicas (reducción). Esto también traerá aparejado la presencia de áreas anódicas y catódicas, es decir, lugares físicos donde ocurrirán las reacciones correspondientes. La figura siguiente muestra un esquema de oxidación de una placa metálica de cinc, sumergida en una solución acuosa de ácido clorhídrico.



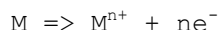
Durante la reacción de corrosión se producen los siguientes fenómenos:

- En la zona anódica se desprenden iones del metal que han cedido electrones, y por lo tanto han adquirido valencia positiva. Aquí es donde se manifiesta la corrosión.
- Se transfieren electrones desde la zona anódica a la catódica a través del metal.
- En la zona catódica los electrones son capturados por los iones H^+ , con lo que los átomos de H adquieren valencia 0 y forman moléculas di-atómicas que escapan a la atmósfera en forma gaseosa.

Reacciones anódicas: La reacción anódica es aquella que ocurre en la zona metálica donde se produce el fenómeno de corrosión. Usualmente el metal estará en un estado de valencia 0 y pasará a un estado de valencia positiva. Por ejemplo en los casos del Zn, Al y Fe, las reacciones anódicas serán las siguientes:

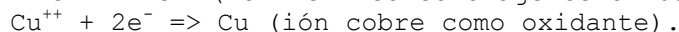
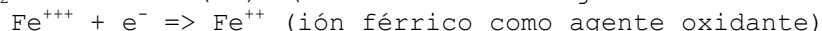
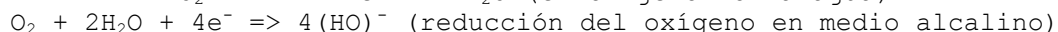
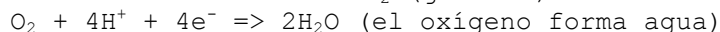
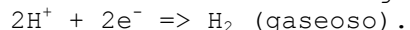


En forma genérica podemos escribir:



El valor "n" depende de cada metal. La plata, por ejemplo es monovalente, en cambio otros como el hierro, titanio, uranio son polivalentes y pueden llegar hasta 6 valencias positivas, por pérdida de sus electrones.

Reacciones catódicas: Las reacciones catódicas se producen en otra zona metálica, más o menos alejada de la zona anódica, y es aquí donde los electrones son capturados para producir algún compuesto reducido respecto de su condición anterior; por ejemplo: el ión hidrógeno toma un electrón y disminuye su valencia positiva hasta el valor de valencia 0. Las reacciones catódicas o de reducción son imprescindibles para que ocurra el fenómeno de la corrosión. Veamos los siguientes casos más comunes:



En los fenómenos de corrosión pueden producirse más de una reacción de oxidación y también de reducción. Por ejemplo en la corrosión de una aleación de cromo-hierro ambos metales se oxidan. Del mismo modo en la corrosión del cinc en un medio ácido que contiene oxígeno disuelto se producirá hidrógeno gaseoso y el oxígeno podrá formar agua.

Corrosión galvánica: En instalaciones industriales es frecuente encontrar diferentes metales o aleaciones combinados y en contacto metal-metal, es decir: contacto

eléctrico. El contacto eléctrico o acoplamiento de metales diferentes suele provocar corrosiones localizadas, a las que denominamos corrosión galvánica. Tomemos como ejemplo metal cinc conectado eléctricamente a platino y ambos sumergidos en una solución acuosa salina, por ejemplo ClNa . En estas condiciones el Platino es inerte, no se corroe, en tanto que el cinc se oxida. Las reacciones que se producen son las siguientes: en la superficie de Zn se desprenden iones metálicos Zn^{++} por pérdida de dos electrones. A través del contacto metálico los electrones migran hacia la superficie del Pt donde se produce la reducción catódica del O_2 , que pasa a formar iones $(\text{HO})^-$ que permanecen en solución, formando hidróxido de Zn.

Serie galvánica: Se denomina serie galvánica a una clasificación convencional de metales y otras sustancias, ordenados según la mayor o menor facilidad que tienen para oxidarse, frente a otros metales y en un ambiente específico. Estos potenciales de oxidación son medidos mediante electrodos tomados como referencia; por ejemplo: electrodo de Cu-sulfato de Cu, o Pt - hidrógeno. Mediante estas mediciones es posible establecer una tabla o serie galvánica, en la que los más nobles o catódicos tienen potenciales positivos, en tanto que los menos nobles, activos o anódicos tienen potenciales negativos:

Metales nobles o catódicos (potenciales positivos):

- Platino
- Oro
- Grafito
- Plata
- Ac. Inoxidable
- Titanio
- Níquel
- Cobre
- Estaño
- Hidrógeno (se toma como referencia: potencial 0)
- Plomo
- Hierro
- Aluminio
- Cinc
- Magnesio
- Potasio
- Sodio



Metales activos o anódicos (potenciales negativos).

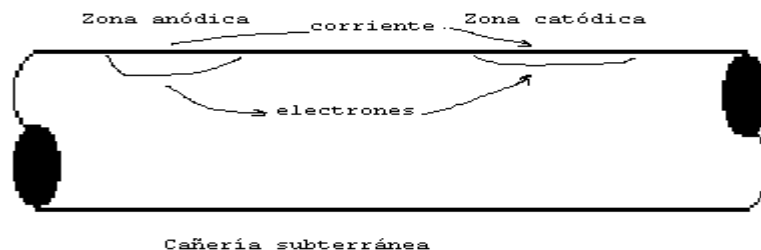
Protección catódica

Sabemos que toda estructura metálica susceptible de corrosión tendrá sectores o zonas catódicas y anódicas. En estas últimas es donde se producirá la corrosión.

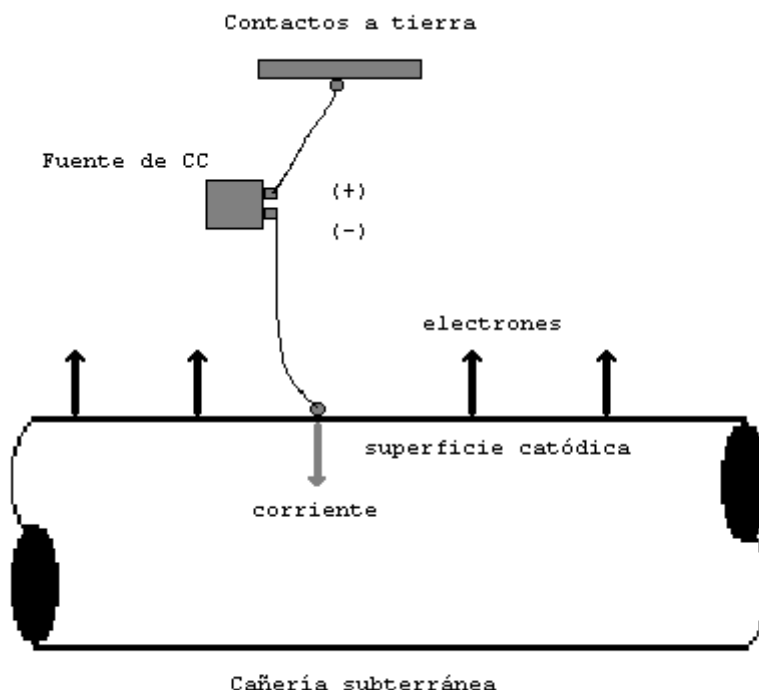
Denominamos protección catódica al mecanismo mediante el cual llevamos toda la estructura metálica a la condición de cátodo, de modo que la corrosión prácticamente desaparezca. Para esto podremos utilizar dos medios:

- Protección por corriente impresa, aplicando a toda la estructura un potencial apropiado de modo que asuma la condición de cátodo respecto del medio que la rodea. Esta forma de protección es normalmente aplicable a estructuras metálicas enterradas o submarinas; por ejemplo: cañerías, pilotes, etc.
- Protección galvánica, vinculando, eléctricamente, a otro metal menos noble, que se transformará en ánodo de sacrificio respecto al que protegemos, el cual tomará el papel de cátodo. Este caso es frecuentemente aplicado a estructuras expuestas a la atmósfera (por ejemplo: techos de chapa, estructuras metálicas, etc) o equipos y recipientes dentro de los cuales circulan líquidos corrosivos (intercambiadores de calor, tuberías, etc).

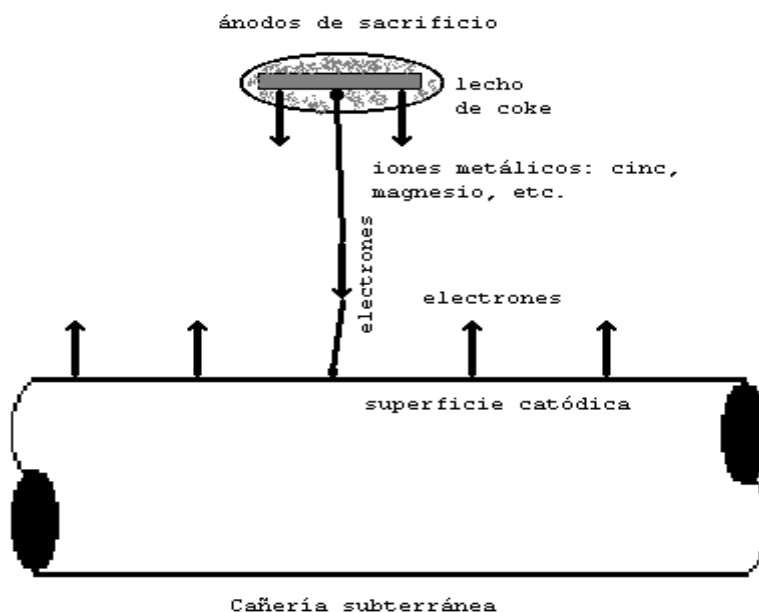
Debemos aquí considerar lo siguiente: convencionalmente se ha adoptado el sentido de circulación de la corriente eléctrica, la dirección inversa a la del flujo de electrones. La figura siguiente muestra el sentido convencional de la corriente en un proceso de corrosión:



Resulta evidente que si, podemos lograr que la estructura tenga una tensión eléctrica, con respecto al medio que la rodea, tal que entregue corriente al medio, en toda su extensión, la habremos transformado en un cátodo. En la figura siguiente vemos cómo esto puede lograrse mediante una corriente impresa:



La siguiente figura muestra cómo se realiza la protección galvánica, mediante conexión eléctrica a un ánodo de sacrificio:



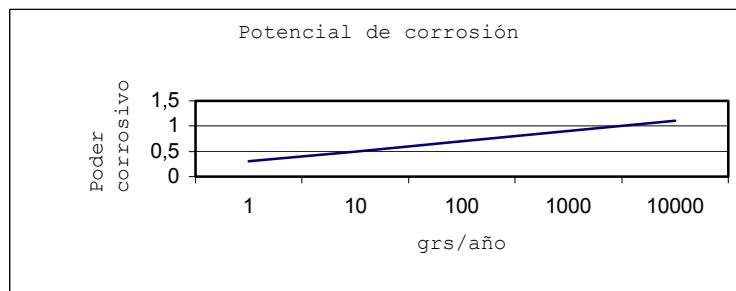
Protección anódica

Con el propósito de analizar los mecanismos de la protección anódica debemos comenzar por revisar el concepto de potencial de corrosión y un fenómeno que aparece en algunos metales y que denominaremos "pasividad".

El potencial de corrosión de un metal, que está sumergido en una solución oxidante, es la medida de la tensión o voltaje entre el metal y la solución corrosiva. Este potencial puede ser medido mediante el uso de electrodos de referencia (calomel, cobre/sulfato de cobre, platino/hidrógeno).

La pasividad es la propiedad que poseen algunos metales de perder su reactividad en determinadas condiciones. Esto sucede, por ejemplo, con cromo, hierro, níquel, titanio y algunas aleaciones de estos metales, que en condiciones en que deberían ser corroídas por soluciones ácidas, esto no sucede.

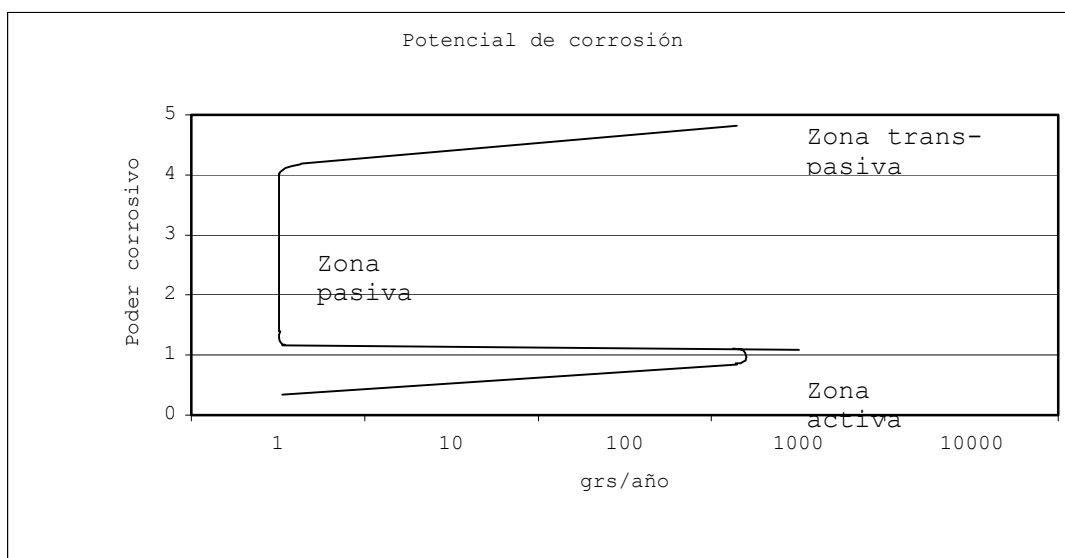
Una forma simple de demostrar la pasividad de estos metales es compararlos con otros que no poseen este comportamiento. Tomemos por ejemplo cinc, cobre o plomo. La siguiente figura (a) muestra como a medida que se incrementa el poder corrosivo de una solución oxidante, se incrementa rápidamente la velocidad de corrosión del metal. Si efectuamos mediciones de potencial de corrosión veremos que el mismo se incrementa en la misma medida que lo hace la concentración de agente corrosivo.



En cambio si el metal muestra comportamiento de pasividad, figura (b), el incremento en la concentración del electrolito oxidante produce un incremento inicial de la velocidad de corrosión, hasta que se produce un rápido decrecimiento de tal velocidad y se mantiene constante a un nivel muy bajo, aún cuando se continúe incrementando la concentración del agente oxidante. A estos niveles del poder corrosivo, les denominamos "zona pasiva". Finalmente nuevos incrementos en la concentración del agente oxidante dará lugar a incrementos en la velocidad de corrosión. A esta zona la denominaremos "trans-pasiva".

El nivel de poder corrosivo, es equivalente al potencial de corrosión del metal sumergido en la solución corrosiva.

Los metales que muestran este comportamiento de pasividad, pueden ser protegidos de la corrosión simplemente aplicando potenciales anódicos hasta alcanzar la zona de pasividad.



La aplicación de protección anódica requiere mucho cuidado para no caer dentro de la zona activa o trans-pasiva, del metal que se desea proteger.