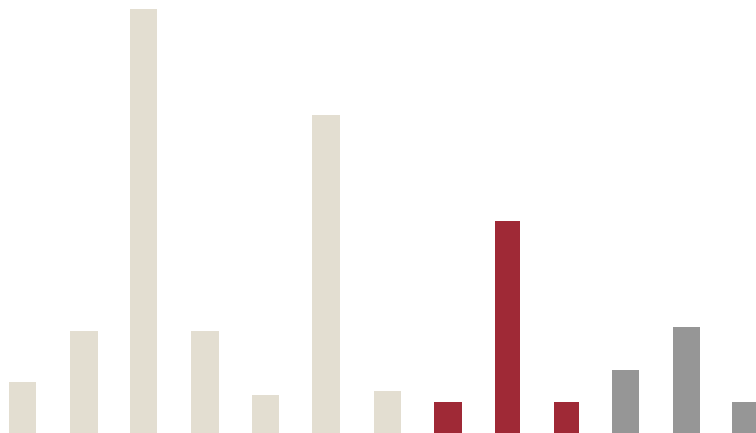




Félix Cesáreo Gómez de León Hijes

Apuntes de
INGENIERÍA DEL MANTENIMIENTO
INDUSTRIAL



UNIVERSIDAD DE
MURCIA

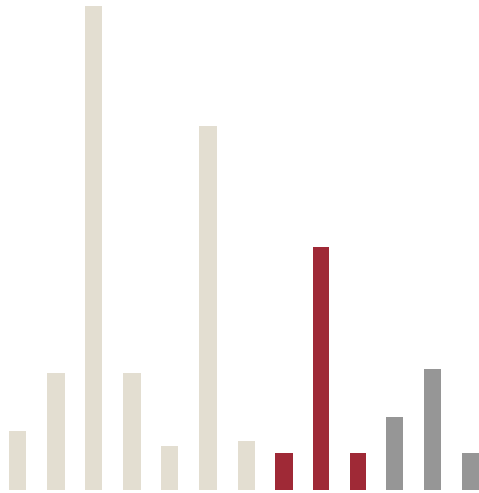
*Colección de apuntes que sirven de guion para el desarrollo de la asignatura **Ingeniería del Mantenimiento Industrial** que se imparte en el cuarto curso del Grado en Ingeniería Química en la Facultad de Química de la Universidad de Murcia.*

Murcia, 1 de mayo de 2026

Félix C. Gómez de León Hijes

ÍNDICE GENERAL

- TEMA 1. Introducción a la Ingeniería del Mantenimiento Industrial
- TEMA 2. Tipos de mantenimiento
- TEMA 3. Bases para el diseño de un plan de mantenimiento
- TEMA 4. Mecanismos de fallo en los equipos e instalaciones
- TEMA 5. Fiabilidad
- TEMA 6. Mantenibilidad y disponibilidad
- TEMA 7. Introducción a las técnicas de inspección de equipos
- TEMA 8. Técnicas de inspección directa
- TEMA 9. Técnicas de inspección indirecta
- TEMA 10. Técnicas basadas en el análisis de la vibración
- TEMA 11. Defectos en equipos dinámicos rotativos



TEMA 1

INTRODUCCIÓN A LA INGENIERÍA DEL MANTENIMIENTO

Ingeniería del Mantenimiento Industrial



ÍNDICE

- 1.1. Antecedentes
- 1.2. Generalidades
- 1.3. Definición del mantenimiento
- 1.4. Definición de ingeniería del mantenimiento

1.1. ANTECEDENTES

- El origen del mantenimiento está, sin lugar a dudas, ligado a la aparición de las primeras herramientas y máquinas. Aunque sin tener cuerpo de doctrina, durante la revolución industrial, a finales del siglo XVIII y comienzos del siglo XIX, las tareas de reparación de la maquinaria entraron a formar parte del mecanismo productivo de la industria, lo que hoy denominamos **Mantenimiento Correctivo**
- El mantenimiento de equipos y máquinas, como actividad organizada, se aplica por vez primera en fundiciones de los Estados Unidos, y en submarinos y aviones militares durante la Primera Guerra Mundial.
- Hacia el año 1920, el mantenimiento y las primeras técnicas de verificación mecánica ya se practicaban en granjas agrícolas y transportes. Una década después, aproximadamente, aparecieron las primeras consultorías en este campo.
- Por aquella misma época, el grupo comercial ARINC (Aeronautical Radio Incorporated) realiza estudios de fiabilidad aplicados a la aviación.
- También aparecen las primeras estadísticas sobre tasas de fallo en motores y equipos instalados en aviones, que son aplicados a la planificación de repuestos.

1.1. Antecedentes

- Durante la Segunda Guerra Mundial y en la posguerra, el mantenimiento experimenta un desarrollo importante, promovido fundamentalmente por las aplicaciones militares, principalmente programas de mantenimiento preventivo en la Armada y en las Fuerzas Aéreas, consistentes en inspeccionar los aviones antes de cada vuelo, y el reemplazo periódico de algunos componentes después de cierto número de horas de funcionamiento, es decir, **Mantenimiento Preventivo**.
- En esta época se cuantifica la fiabilidad de los componentes de las bombas alemanas V1 y V2, con el fin de mejorar la fiabilidad de todo el conjunto. La expresión que arrojaba la probabilidad de éxito de un sistema, venía dada por el producto de las probabilidades de éxito individuales de cada uno de sus componentes.
- La utilización de equipos redundantes, en ciertos procesos productivos, comienza a hacerse extensiva a mediados del siglo XX, de este modo se consiguen notables disminuciones en las tasas de fallo del proceso.
- Paralelamente, comienzan a aplicarse algunas técnicas de ensayo y análisis de parámetros funcionales de la máquina que muestran indicios acerca de su estado, lo que permite su reparación o reemplazo según condición y, con ello, disminuir la probabilidad de fallo de la máquina.

1.1. Antecedentes

- **A partir de los años 50** comienzan a distinguirse dos líneas de trabajo bien definidas dentro del mantenimiento industrial: por un lado las técnicas de análisis de la fiabilidad de los equipos, ya mencionadas; por otro lado las técnicas de verificación mecánica, cuya finalidad es la detección prematura de los posibles fallos o defectos en las máquinas, lo que supone el advenimiento formal del **Mantenimiento Predictivo**.
- Dentro de la primera línea cabe mencionar trabajos acerca de la planificación del mantenimiento, resaltando la gran utilidad de disponer de estadísticas que reflejaran la evolución histórica de las máquinas y sus averías.
- En cuanto a la segunda línea, en la ASME Petroleum Mechanical Engineering Conference de Dallas, en **septiembre de 1968**, se publican por primera vez las características de la vibración producida por los defectos más frecuentes de la maquinaria rotativa.
- En cuanto al desarrollo experimentado en las últimas décadas por el mantenimiento, puede decirse que la historia reciente del mismo ha supuesto la confirmación de la **Ingeniería del Mantenimiento** como una tecnología con un cuerpo de doctrina propio.

1.1. Antecedentes

- Mientras que a comienzos de los 50, los ingenieros de los EE.UU. realizaban estudios teóricos acerca del mantenimiento industrial, y empezaban a aplicar de forma sistemática una tecnología de mantenimiento, en la U.R.S.S. se empezó por estudiar un sistema de mantenimiento de máquinas herramientas.
- En la Europa occidental, la preocupación por la tecnología de mantenimiento llegó algo más tarde.
- En 1961 nace el *Swedish Preventive Maintenance System*. Posteriormente, en 1962, esta tecnología es implantada en ciertas industrias de Polonia, en un proyecto de la Organización Internacional del Trabajo, con fondos de la ONU.
- En 1970, el Ministerio de Tecnología del Reino Unido publica un informe sobre la incidencia del mantenimiento en la economía nacional, y posteriormente, en 1977 se establecen nuevas previsiones para el final de la década. Estas previsiones representaban un notable incremento acorde con los datos procedentes de la economía americana, en el sentido de que las plantas más modernas tienen un mantenimiento más caro.

1.1. Antecedentes

- En esta década, el mantenimiento es visto desde dos enfoques diferentes, como son los de la escuela soviética y de la escuela occidental.
 - La escuela soviética, contempla los parámetros del mantenimiento de máquinas desde el punto de vista constructivo, introduciendo los conceptos de salud y envejecimiento, análogamente a los biológicos.
 - La escuela occidental contempla los conceptos económicos de libre mercado, como factores fundamentales para determinar la rentabilidad de la reparación, y que pueden aconsejar en algunos casos la renovación de la maquinaria. En este sentido destacan algunas estudios acerca del coste del ciclo de vida (LCC o "live cycle costing").
- **En 1965** Cooley y Tukey, desarrollan el algoritmo de la transformada rápida de Fourier (FFT), que actualmente es utilizado sistemáticamente por los instrumentos analizadores de espectro.
- En 1970, R. Martin, basándose en la geometría de los rodamientos, calcula las frecuencias rotacionales de los defectos puntuales en cada uno de sus componentes.
- En 1983, R. Randall (de la firma Brüel & Kjaer) propone la técnica del Cepstrum, y explica sus ventajas para la detección de defectos en engranajes y rodamientos.

1.1. Antecedentes

- **En la década de los 80**, además de los estudios que se van produciendo en el campo de la diagnosis y el tratamiento de señales, el hecho más destacado es la introducción, de forma masiva, de las técnicas de monitorización de los parámetros funcionales más significativos de los equipos críticos.
- En la aviación comercial, modelos como el DC-10, Concorde y Airbus incorporan monitorización de estado para analizar los datos de las unidades en servicio. La **monitorización** de vibraciones y otros parámetros se hace extensiva en las grandes plantas de proceso industrial, principalmente en el sector petroquímico, pero también, hoy día, es normal en mayor o menor medida en todos los automóviles.
- A principios de **la década de los noventa** se produce una verdadera explosión de **productos informáticos** en todas las plataformas de computación, específicos para monitorización, control y análisis de señales, y que pronto comienzan a introducirse en el mundo del mantenimiento predictivo.
- Con el **siglo XXI** se consolida el desarrollo de la **sensorización inalámbrica**, el almacenamiento y computación masiva de datos en la nube (*Cloud Computing*) y el uso de la **Inteligencia Artificial** para el análisis de procesos y datos de mantenimiento, con sistemas que incorporan **ayuda inteligente al diagnóstico**.

1.2. GENERALIDADES

- La necesidad de la industria competitiva actual de asegurar el correcto funcionamiento de los equipos de producción, así como de obtener de ellos la **máxima disponibilidad**, ha originado una significativa evolución del mantenimiento industrial en las últimas décadas.
- El Mantenimiento industrial ha pasado de utilizar métodos puramente estáticos (a la espera de la avería) a métodos dinámicos (seguimiento funcional y control multiparamétrico) con la finalidad de predecir las averías en una etapa incipiente, pronosticar su evolución, determinar la causa del problema y, por tanto, procurar erradicarla.
- El concepto del mantenimiento puede definirse de distintas formas, atendiendo al enfoque y los objetivos a conseguir. En cualquier caso, va mucho más allá de aspectos simplemente reparativos o económicos.
- El punto de partida del mantenimiento en la industria es **mantener el correcto estado funcional de los equipos e instalaciones**, sin embargo las consecuencias que el desarrollo de este planteamiento básico pueden tener sobrepasan ampliamente el objetivo inicial.

1.2. Generalidades

La mejora de las condiciones funcionales de los equipos incide directamente en la **seguridad de las instalaciones**

y, por tanto, en la **disminución de los riesgos laborales.**

Por otra parte, un funcionamiento óptimo de la maquinaria redonda en una **disminución de los niveles de vibración y de ruido,**

lo que contribuye a **mejorar las condiciones del ambiente de trabajo.**

ODS 3
(ONU)

Además, obtener el máximo aprovechamiento de la vida útil de los equipos e instalaciones es también una aportación, nada desdeñable, a un

desarrollo industrial sostenible,

ODS 9 (ONU)

y consecuentemente repercute positivamente en una

mejor conservación del medio ambiente,

ya que el aprovechamiento óptimo de los recursos conduce a una

disminución del consumo energético,

ODS 7 (ONU)

y a una

reducción del volumen de desechos industriales.

ODS 12
(ONU)

1.2. Generalidades

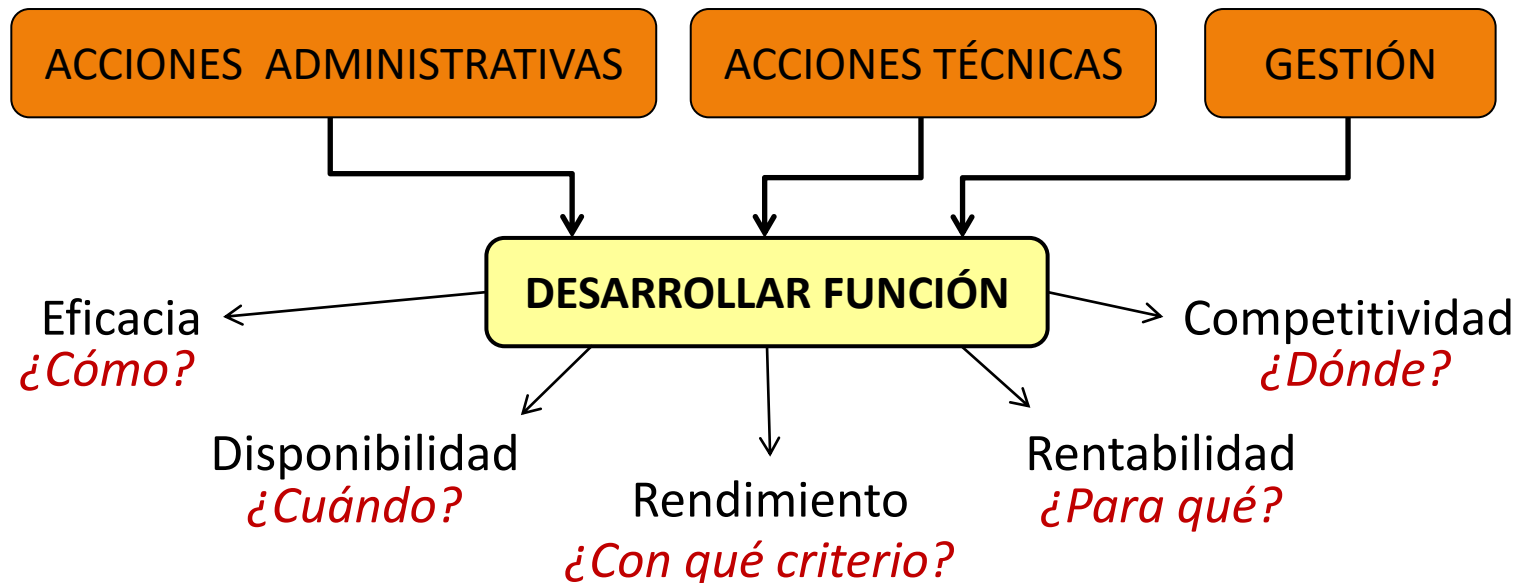
- **El mantenimiento ha pasado** de ser considerado como una actividad necesaria pero improductiva, **a formar parte integrante del sistema de producción**, desde el momento en el que es capaz de mantener la capacidad productiva.
- El desarrollo de los instrumentos de medida, sistemas de computación y comunicaciones ha contribuido, sin lugar a dudas, a la consolidación de las técnicas de mantenimiento predictivo en equipos dinámicos.
- La tendencia actual, en el mantenimiento predictivo, apunta a un mayor nivel de sensorización de los equipos para su monitorización y al uso de la Inteligencia Artificial.
- Por otra parte, la utilización de la informática para la gestión del mantenimiento (**GMAO***), ha evolucionado desde unos planteamientos estáticos en la gestión de los datos a avanzar hacia actitudes dinámicas de utilización de los datos como elementos con capacidad de predicción, a partir de modelos de evolución, como sucede con los análisis de fiabilidad.
- La tendencia actual apunta claramente a la incorporación de herramientas de Inteligencia Artificial para el uso inteligente de los datos mediante Sistemas Basados en Conocimiento (Knowledge-Based Systems) y Machine Learning.

* CMMS (Computerized Maintenance Management System)

1.3. DEFINICIÓN DE MANTENIMIENTO

La definición más aceptada de la **función del Mantenimiento** está recogida en la norma UNE-EN 13306:2002:

Combinación de todas las acciones técnicas, administrativas y de gestión durante el período de vida de un elemento, destinadas a conservarlo o devolverlo a un estado en el cual puede desarrollar una función requerida.



1.4. DEFINICIÓN DE INGENIERÍA DEL MANTENIMIENTO

El 23 de noviembre de 2022 el CEN¹ definió a la **Ingeniería del Mantenimiento** como (EN 17666:2022):

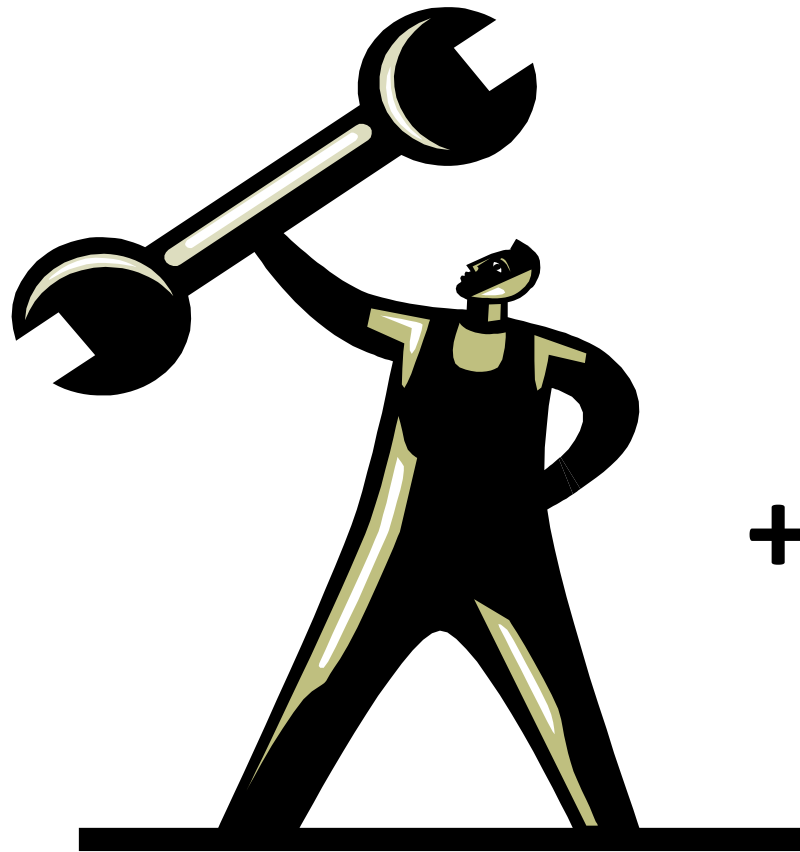
“Disciplina de ingeniería que aplica conocimientos, métodos, técnicas y herramientas para desarrollar y apoyar el mantenimiento con el fin de garantizar que un activo sea capaz de realizar sus funciones requeridas de forma segura, sostenible y rentable durante todo su ciclo de vida”.

Entre sus contribuciones y objetivos cita los siguientes:

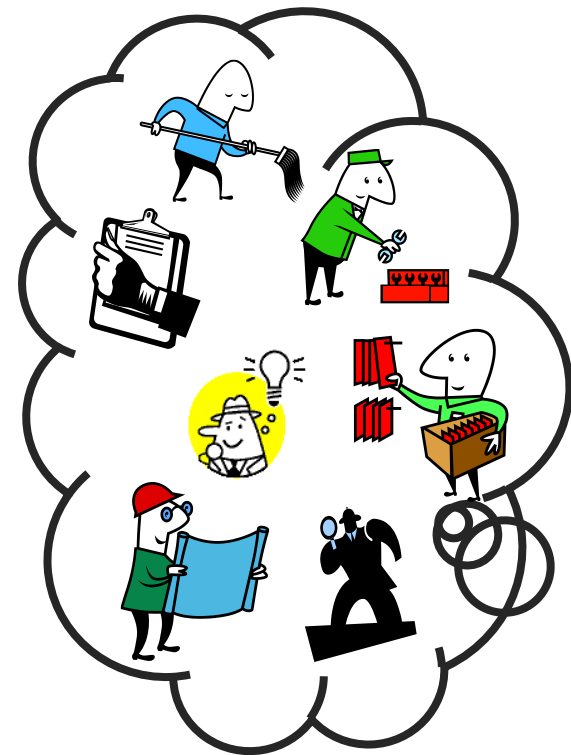
- Conseguir eficazmente y eficientemente las prestaciones requeridas
- Alcanzar elevadas cotas de fiabilidad
- Analizar los riesgos inherentes a la falta de mantenimiento
- La sostenibilidad
- Reducir el consumo energético y la huella de carbono
- Minimizar el LCC
- Mejorar los procesos y productos...

¹ CEN: Comité Europeo de Normalización (estandarización)

1.4. Definición de ingeniería del mantenimiento

PLANTEAMIENTO TRADICIONAL:**REACTIVO****Reparar el fallo**

+

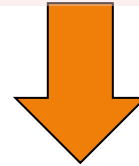


GESTIÓN DE LAS REPARACIONES

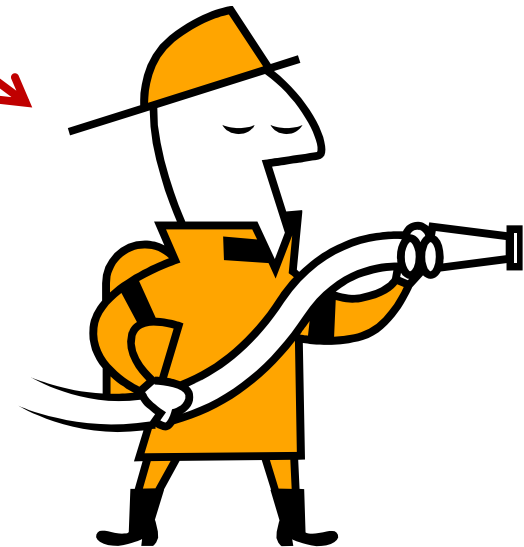
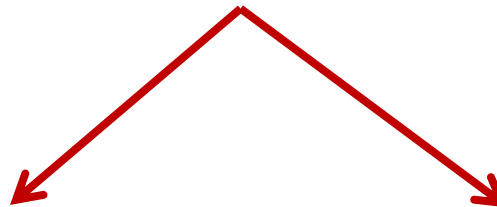
1.4. Definición de ingeniería del mantenimiento

PLANTEAMIENTO TRADICIONAL:

Se actúa cuando el fallo ya se ha producido

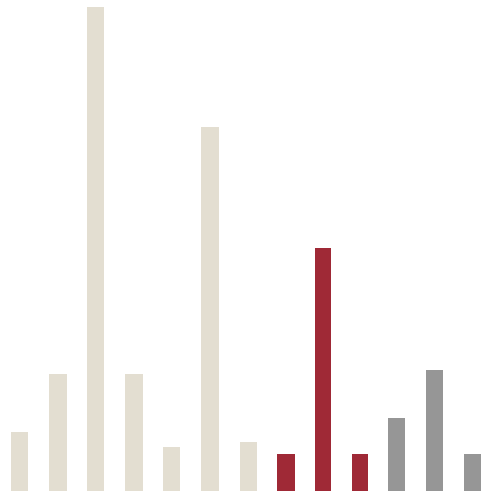


RESULTADO



1.4. Definición de ingeniería del mantenimiento

PLANTEAMIENTO ACTUAL:**GESTIÓN DE ACTIVOS****Evitar y prevenir el fallo**



TEMA 2

TIPOS DE MANTENIMIENTO

Ingeniería del Mantenimiento Industrial



ÍNDICE

- 2.1. Clasificación
- 2.2. Mantenimiento correctivo
- 2.3. Mantenimiento preventivo
- 2.4. Mantenimiento predictivo
- 2.5. Periodicidad y alcance las inspecciones
- 2.6. Mantenimiento centrado en fiabilidad
- 2.7. Mantenimiento productivo total
- 2.8. Coste del mantenimiento

2.1. CLASIFICACIÓN

- La clasificación mas extendida del mantenimiento es la que está basada en la actitud frente al fallo y es, de alguna manera, un reflejo de la evolución de la función del mantenimiento a lo largo de su historia.
- Conforme a este planteamiento, los tipos básicos de mantenimiento son:
 - ***Mantenimiento Correctivo****
 - ***Mantenimiento Preventivo***
 - ***Mantenimiento Predictivo***
- Pese a que estas denominaciones han sido, y siguen siendo, matizadas -en algunas ocasiones con bastante razón-, lo cierto es que se siguen usando hoy día de forma generalizada.
- Atendiendo a criterios más amplios, que conjugan los planteamientos anteriores con otros aspectos metodológicos o de política de empresa, se definen otras estrategias de mantenimiento, como son RCM, TPM, Lean Maintenance, etc., algunos de los cuales se estudiarán más adelante.

* Sería más adecuado llamarle ***Reactivo*** y llamar *Correctivo* a la intervención correctora en sí, sea planificada o no.

2.2. MANTENIMIENTO CORRECTIVO

- También denominado: “A ROTURA” o “BREAKDOWN MAINTENANCE”
- Se trata de una estrategia pasiva, a la espera de la avería.
- En general, se desconoce el estado del equipo durante su funcionamiento.

VENTAJAS

- No precisa de ninguna inversión inicial
- Es aconsejable cuando los costes derivados de las averías son de poca importancia.
- No requiere planificación específica.

INCONVENIENTES

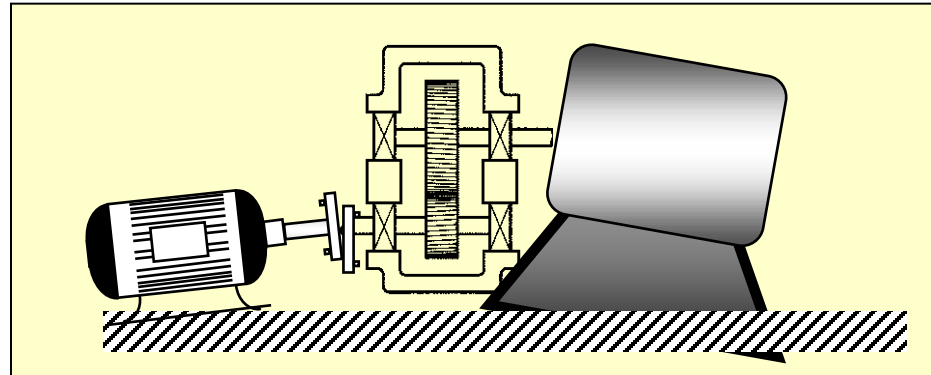
- Las averías se producen de forma imprevista, lo que implica una mayor repercusión en el proceso productivo y mayor tiempo de reparación.
- Las averías pueden ser graves y costosas.
- Las averías pueden venir acompañadas de accidentes. El mantenimiento correctivo no contribuye a mejorar la seguridad de la instalación.
- Sin embargo, **en toda instalación siempre hay equipos a los que sólo se les aplica mantenimiento correctivo.**

2.2. Mantenimiento correctivo

No se actúa hasta que se ha producido la avería.

Ventajas

- Inversión inicial mínima.



¡Hasta que se rompa!



Inconvenientes

- Gastos incontrolados por roturas, riesgos de accidentes,...
- Pérdidas por paradas de producción evitables, por mantenimientos no esperados, por pérdida de productos de fabricación, requiere mayor stocks en piezas,...

2.3. MANTENIMIENTO PREVENTIVO

- Consiste en realizar INSPECCIONES PERIÓDICAS en las que se desmonta el equipo -total o parcialmente- para REVISAR su estado y REEMPLAZAR* ciertos componentes de forma sistemática o a la vista de su condición.
- La clave del éxito de este tipo de mantenimiento está en la correcta elección del PERIODO DE INSPECCIÓN y de REEMPLAZO.
- Elegir un periodo de tiempo corto implica:
 - Mayor fiabilidad (y más seguridad)
 - Aumento de los tiempos de parada
 - Menos averías imprevistas
 - Aumento de costes por inspecciones y paradas
- Elegir un periodo de tiempo largo implica:
 - Menos tiempo en parada.
 - Menor fiabilidad (más riesgo).
 - Disminución de los costes inicialmente.
 - Aumento del riesgo de averías costosas.
- Exige una solución de compromiso entre todos los factores intervinientes, tomando como referencia la vida esperada de los componentes.

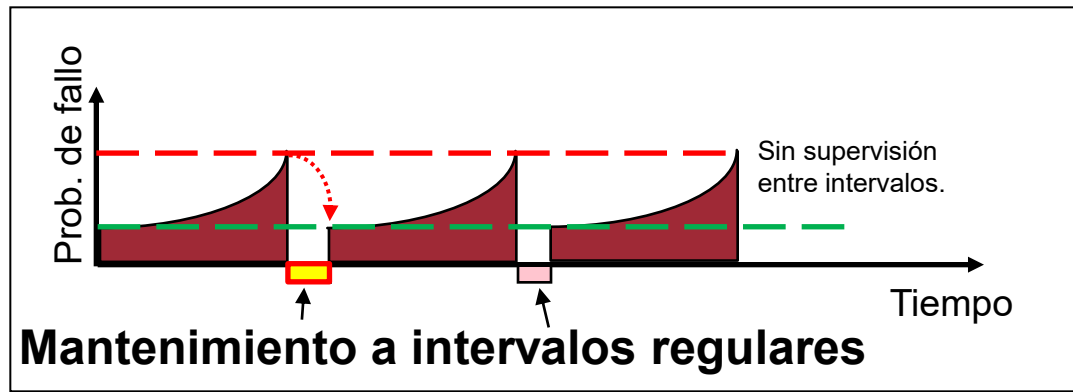
* O REPARAR, si procede.

2.3. Mantenimiento preventivo

- Este tipo de mantenimiento tiene como finalidad adelantarse al fallo mediante el reemplazo de los componentes deteriorados antes de que alcancen el final de su vida útil.
- La estimación de la vida útil de los componentes o su velocidad de deterioro es, por tanto, la clave para determinar el periodo de inspección.
- Con este mantenimiento se pretende conseguir altos valores de *Fiabilidad* en los equipos. Sin embargo:
 - Se pueden estar reemplazando elementos innecesariamente por estar aún en buen estado.
 - Se pueden introducir defectos de montaje.
 - Presenta el grave inconveniente del coste de las inspecciones y el reemplazo sistemático de componentes.
 - Sea cual sea el período de inspección fijado, no se elimina por completo la posibilidad de una avería imprevista entre dos inspecciones consecutivas.

2.3. Mantenimiento preventivo

Se estima la duración teórica de los elementos mecánicos y se reemplazan antes de que sobrepasen esta duración.



Costes elevados



Ventajas

- Menos fallos imprevistos.
- Disminuyen las paradas por avería.
- Disminuyen los riesgos

Inconvenientes

- Todavía pueden ocurrir averías imprevistas entre inspecciones.
- Pérdidas por paradas de producción para inspección.
- Gastos en piezas renovadas en buenas condiciones.
- La manipulación de máquinas en buen estado puede producir averías o no restaurar la condición inicial.

2.4. MANTENIMIENTO PREDICTIVO

- También conocido como: “MANTENIMIENTO BASADO EN LA CONDICIÓN”.
- La idea básica de este tipo de mantenimiento consiste en intentar conocer en todo momento el estado del equipo y, por tanto, de sus componentes.
- De esta forma, si se conoce en todo momento cuál es el estado del equipo, únicamente se interviene cuando su estado lo aconseje.
- La aplicación del mantenimiento predictivo se apoya en dos pilares fundamentales:
 - La existencia de *parámetros de significación funcional* indicadores del estado del equipo.
 - La vigilancia continua del equipo.
- La mayoría de los componentes de las máquinas avisan de alguna manera de su fallo antes de que éste ocurra.
- Por lo tanto, si mediante el seguimiento de ciertos parámetros funcionales es posible detectar prematuramente el fallo de la máquina, se podrá intervenir antes de que este se produzca y, consiguientemente, evitar el fallo inesperado y sus consecuencias.

2.4. Mantenimiento predictivo

- Sin embargo, en primer lugar, no existe ningún parámetro funcional, ni siquiera una combinación de ellos, capaz de reflejar exactamente el estado de una máquina.
- En segundo lugar, no es económicamente viable una vigilancia continua (monitorización) de todos los parámetros funcionales significativos para todos y cada uno de los equipos de una instalación.
- Como consecuencia de estas limitaciones puede suceder realmente que:
 - Al no monitorizar la máquina, el fallo se produzca en el intervalo de tiempo comprendido entre dos medidas consecutivas.
 - Un defecto no pueda ser detectado con la medición y análisis de los parámetros incluidos en el programa.
 - Aun siendo detectado un defecto, éste no sea diagnosticado correctamente o en toda su gravedad.
 - Aun habiéndose realizado un diagnóstico correcto, no sea posible programar la parada de la máquina para el momento oportuno, y sea preciso asumir el riesgo de fallo hasta que pueda llevarse a cabo la parada.

2.4. Mantenimiento predictivo

- Entre las ventajas más importantes que reporta este tipo de mantenimiento, pueden citarse las siguientes:
 - Detectar e identificar prematuramente los defectos sin necesidad de parar y desmontar la máquina.
 - Observar aquellos defectos que sólo se manifiestan sobre la máquina en funcionamiento.
 - Seguir la evolución del defecto hasta que se estime que es peligroso.
 - Elaborar un historial del funcionamiento de la máquina, a través de la evolución de sus parámetros funcionales, e intervenciones realizadas.
 - Programar la parada para la corrección del defecto detectado en el momento más adecuado.
 - Programar el suministro de repuestos y la mano de obra.
 - Reducir el tiempo de reparación, ya que previamente se ha identificado el origen de la avería y los elementos afectados por la misma.
 - Aislar las causas de los posibles fallos repetitivos con el fin de procurar su erradicación.
 - Proporcionar criterios para una selección satisfactoria de las mejores condiciones de operación de la máquina.
 - Aumentar la seguridad de funcionamiento de la máquina, y en general de toda la instalación.

2.4. Mantenimiento predictivo

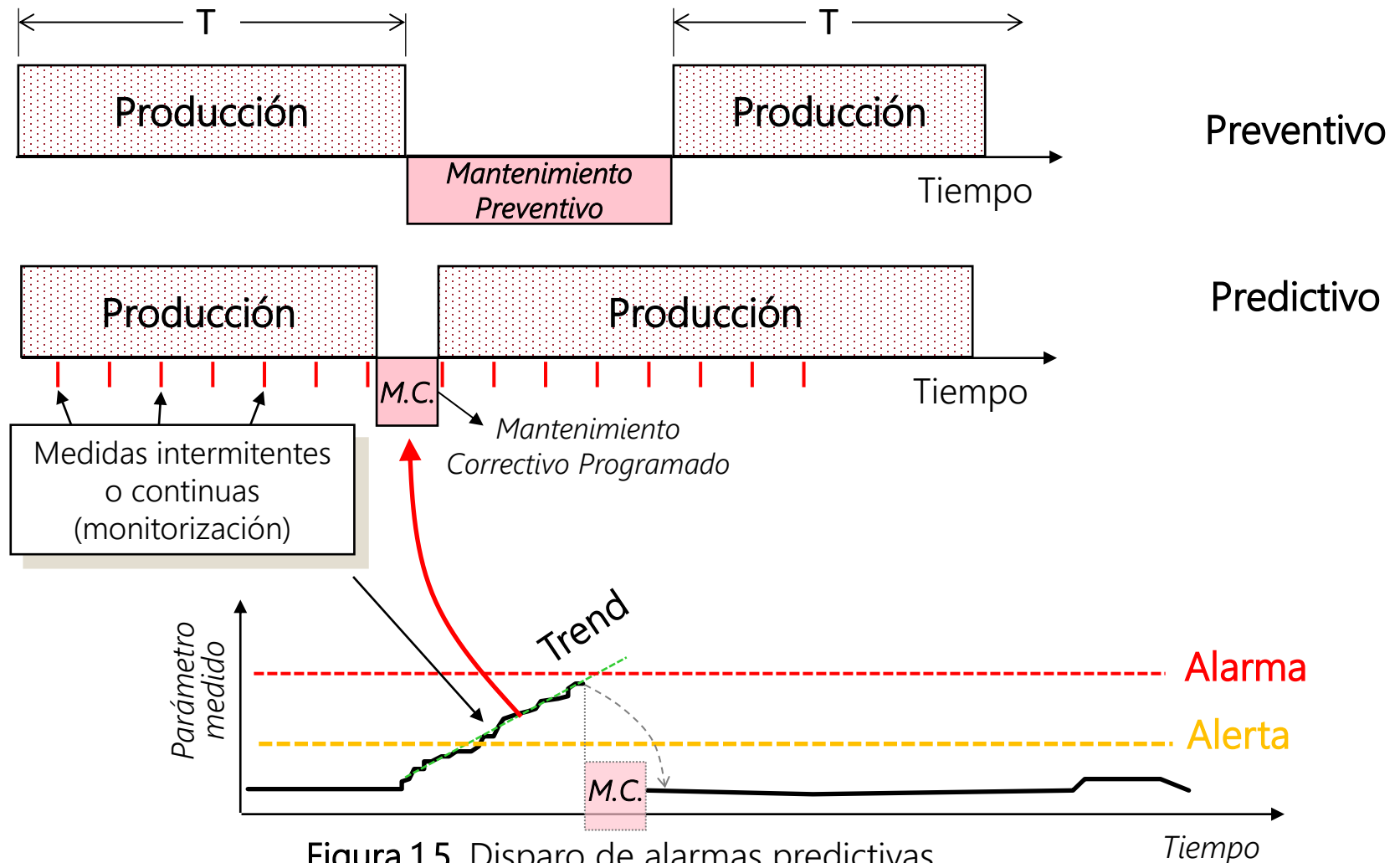


Figura 1.5. Disparo de alarmas predictivas

2.5. PERIODICIDAD Y ALCANCE DE LAS INSPECCIONES

- En general, se entiende por **inspección** el desmontaje total o parcial de un equipo o instalación, para revisar su estado. Es la base del mantenimiento preventivo.
- Para el examen y análisis periódico (*off line*) de los parámetros de significación funcional, propios del mantenimiento predictivo, está ampliamente extendida la designación de **ruta de medida**.
- En ambas situaciones se plantean los mismos interrogantes: ¿cuál debe ser el alcance de las actuaciones? y ¿con qué periodicidad deben realizarse?
- La finalidad de cualquier inspección debe ser:
 1. Asegurar que el uso y régimen funcional del equipo responde a las especificaciones de diseño.
 2. Examinar/Medir aquellos componentes que potencialmente presenten una mayor exposición al fallo.
 3. Identificar, si los hubiere, aquellos componentes que se encuentren deteriorados o fuera de sus condiciones operativas normales.
 4. Si se aprecia que algún elemento se encuentra en condiciones de fallo, estimar el tiempo útil de vida hasta la aparición del fallo, con el fin de prever su reparación o reemplazo.

2.5. Periodicidad y alcance de las inspecciones

- Las inspecciones deben centrarse en los elementos más críticos del proceso productivo y especialmente en aquellos que presentan mayor exposición al fallo.
- A título orientativo, en la tabla 2.1 se indica una relación de algunos componentes importantes que generalmente están expuestos al fallo.
- Una vez determinado el alcance de las inspecciones, debe establecerse la periodicidad de las mismas.
- El indicador más relevante a la hora de decidir el periodo de tiempo entre inspecciones, o bien el tiempo que debe mediar entre una ruta de medida y la siguiente, es la propia experiencia en la misma instalación o en otras similares.
- En aquellos equipos en los que la evolución hacia el fallo se produce de una forma gradual, los periodos serán mayores que en aquellos casos en los que la evolución hacia el fallo se produce en poco tiempo.
- El criterio general a aplicar es que el periodo entre inspecciones (o rutas de medida) debe ser netamente inferior al tiempo de evolución desde la aparición de un defecto hasta que sobreviene el fallo.

2.5. Periodicidad y alcance de las inspecciones

Tabla 2.1. Componentes potencialmente más expuestos al fallo.

ESTACIONARIOS	ROTATIVOS	ALTERNATIVOS	OTROS
Bancada	Ejes	Pistones	Freno
Carcasa	Rotores	Palancas	Embrague
Elementos fijación	Álabes	Seguidor de leva	Cierres y sellos
Tanques	Impulsores	Válvulas	Rodamientos
Recipientes a presión	Volantes de inercia	Cables y cadenas	Cojinetes deslizam.
Tuberías	Engranajes	Diafragmas	Circuitos lubricación
Intercambiadores	Levas	Muelles	Circuito refrigeración
Separadores	Accionamientos	Guías y correderas	Instrum. de medida
Distribuidores	Acoplamientos		Circuitos eléctricos
Colectores	Poleas y correas		Conexiones

2.6. MANTENIMIENTO CENTRADO EN FIABILIDAD

- El mantenimiento centrado en la fiabilidad, conocido simplemente por **RCM** (*Reliability Centered Maintenance*), tiene como objetivo decidir cuáles son las tareas de mantenimiento más adecuadas para cada equipo y situación.
- Aunque existen diferentes versiones de la propuesta original, la definición más aceptada actualmente de RCM es la siguiente:

RCM proporciona un método que identifica las funciones de un sistema, la forma en que esas funciones pueden fallar y que establece a priori tareas de mantenimiento preventivo aplicables y efectivas, basadas siempre en consideraciones que tienen que ver con la seguridad y la economía del sistema.

- El RCM tuvo su origen en la Industria Aeronáutica, en la década de los sesenta, como consecuencia del elevado número de accidentes.
- Fue definido por vez primera por los empleados de United Airlines Stanley Nowlan y Howard Heap en su libro “Reliability Centered Maintenance”.

2.6. Mantenimiento centrado en fiabilidad

- De una forma estructurada y sistemática el RCM intenta dar respuesta a las 7 preguntas siguientes:
 1. ¿Cuáles son las funciones?
 2. ¿De qué forma puede fallar?
 3. ¿Qué causa que falle?
 4. ¿Qué efectos directos produce el fallo?
 5. ¿Qué consecuencias para el servicio -o la empresa- produce el fallo?
 6. ¿Qué se puede hacer para prevenir los fallos?
 7. ¿Qué sucede si no puede prevenirse el fallo?

2.6. Mantenimiento centrado en fiabilidad

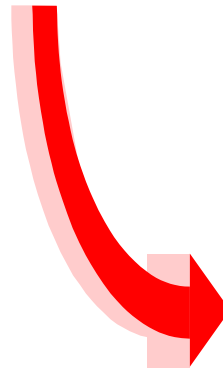
- A finales de los años cincuenta, la aviación comercial mundial estaba sufriendo más de 60 accidentes por millón de despegues.
 - Si actualmente se presentara la misma tasa de accidentes, estaríamos hablando de 2 accidentes aéreos diariamente en algún sitio del mundo. Dos tercios de los accidentes ocurridos al final de los cincuenta eran causados por fallos de los equipos.
- El hecho de que una tasa tan alta de accidentes fuera causada por fallos en los equipos implicaba que, al menos inicialmente, el principal enfoque tenía que hacerse en la seguridad de los equipos.
- En esos días, todos esperaban que los motores y otras partes importantes se “gastaran” después de cierto tiempo. Esto condujo a creer que las reparaciones periódicas impedirían el fallo de las piezas antes de que se gastaran, previniendo así su fallo. Mantenimiento significaba una cosa: reparaciones periódicas.
- Al comprobar que la idea no estaba funcionando, se asumió que las reparaciones se estaban realizando de manera muy tardía, después que el desgaste se había iniciado. Naturalmente, el esfuerzo inicial era para acortar el tiempo entre reparaciones, pero en la mayoría de los casos, los porcentajes de fallo no se reducían, sino que por el contrario aumentaban.

2.6. Mantenimiento centrado en fiabilidad

- Es así como el RCM encuentra sus inicios. El trabajo del desarrollo inicial fue hecho por la Industria de la Aviación Civil Norteamericana, y se hizo realidad cuando las aerolíneas comprendieron que muchas de sus filosofías de mantenimiento eran no sólo costosas, sino que también altamente peligrosas.
- Durante los años 60 y 70 las fuerzas armadas americanas se propusieron desarrollar procesos RCM para su propio uso: uno para el ejército, otro para la fuerza aérea y otro para la armada.
- Al principio de los años 80 el Instituto para la Investigación de la Energía Eléctrica (EPRI) realizó dos aplicaciones piloto de RCM en la industria de la energía nuclear americana. Su interés surgió de que esta industria tenía sobremantenimiento masivo a sus equipos. Su principal propósito era reducir costos de mantenimiento sin merma de la fiabilidad.
- Desde los inicios de los años 90, varias organizaciones desarrollaron versiones del proceso RCM original, hasta que en 1997 un comité de la American Society of Automotive Engineers (SAE), desarrolló una norma RCM.

2.7. MANTENIMIENTO PRODUCTIVO TOTAL

- El Mantenimiento Productivo Total, **TPM** (*Total Productive Maintenance*). tiene como finalidad el mantenimiento de estándares y la búsqueda permanente de la mejora de los mismos mediante el cuidado y la correcta explotación de los sistemas y procesos básicos productivos, manteniéndolos en su “estado de referencia” y aplicando sobre ellos la mejora continua.



Se define como “*estado de referencia*” aquel en que el equipo de producción puede proporcionar su mayor rendimiento en función de su concepción y de su situación en el proceso productivo.

2.7. Mantenimiento productivo total

Características esenciales del TPM

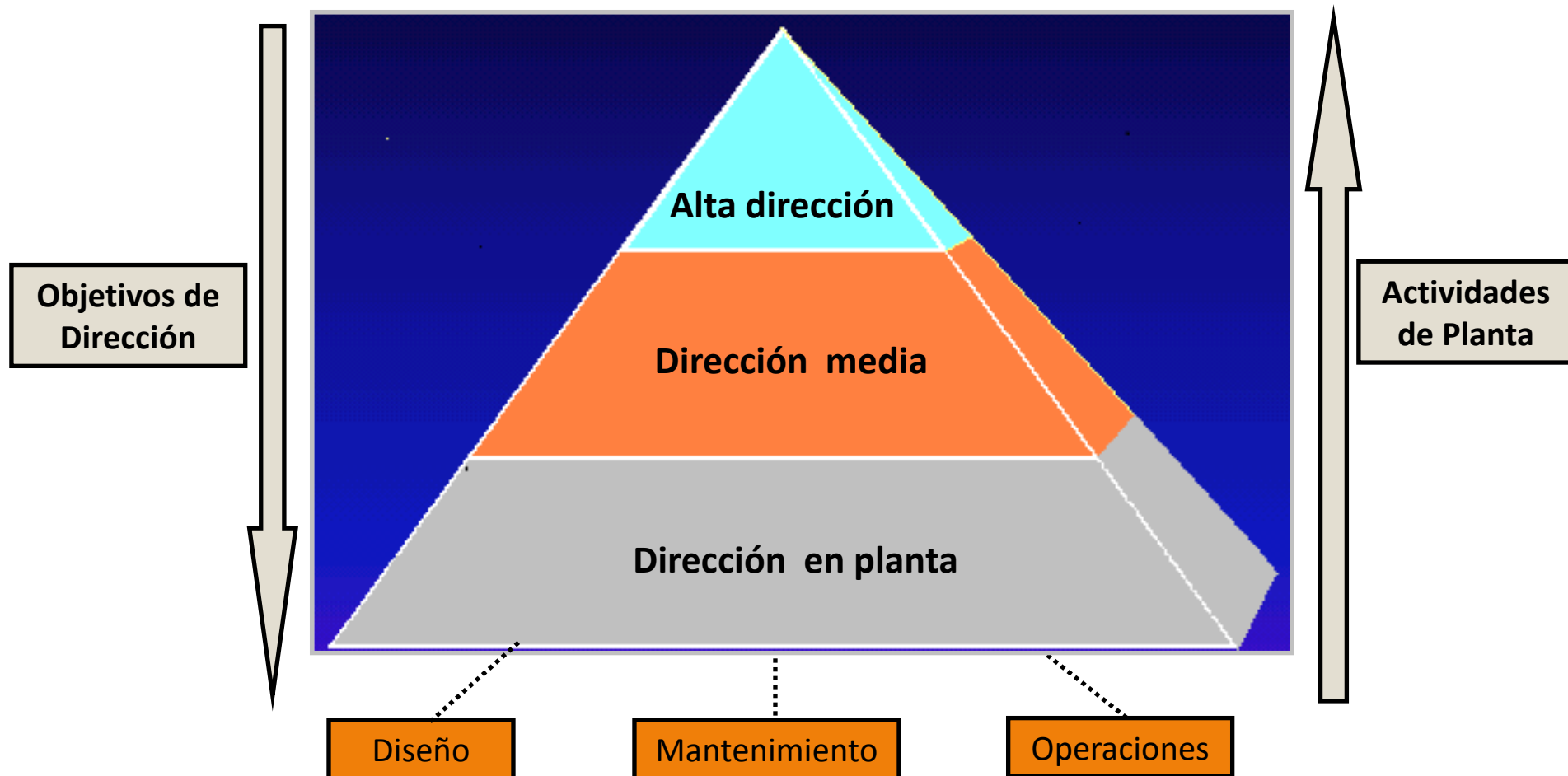
- Implica una participación activa de todos los miembros y funciones de la organización.
- En un Plan de TPM se deben conjugar adecuadamente los distintos tipos básicos de mantenimiento: correctivo, preventivo y predictivo.
- Requiere una formación preliminar a todos los niveles de la empresa para afrontar correctamente los cambios en la organización.
- Pretende llegar a la situación de “cero averías”

Una correcta planificación de las actividades de mantenimiento debería eliminar las averías imprevistas.

El objetivo de “cero averías” supone que cualquier actuación correctiva debe estar planificada previamente.



2.7. Mantenimiento productivo total

Estructura promocional del TPM

2.7. Mantenimiento productivo total

Automantenimiento

- Es una parte esencial del TPM.
- Supone la integración del mantenimiento en la estructura operativa de producción.
- Se aplica básicamente en el nivel de operarios de planta.
- Consiste en la realización de rondas o inspecciones rutinarias en las que se efectúan: actividades de limpieza, controles visuales, medidas simples de parámetros, lubricación de puntos de engrase, pequeños ajustes y otras operaciones simples de mantenimiento.

2.7. Mantenimiento productivo total

Objetivos del Automantenimiento

- Llegar a modificar el entorno de trabajo, preparando y realizando un plan “5S” para que el operario de fabricación asuma ciertas responsabilidades en la funcionalidad de su puesto de trabajo.
- Preparar a los operadores de fabricación para que lleguen a dominar sus equipos/instalaciones de producción, con el fin de asegurar el mantenimiento de su estado de referencia.
- Organizar y realizar el mantenimiento autónomo y mejorarlo de forma continua, aportando ideas para optimizar las condiciones de trabajo, tanto del operador como de la operación.

“5S”

- | | | |
|-------------------------|---|--------------------------|
| • Seiri (organización) | → | ESTRUCTURA ORGANIZATIVA |
| • Seiton (orden) | → | PROTOCOLOS DE ACTUACIÓN |
| • Seisho (pureza) | → | CORRECCIÓN EJECUTIVA |
| • Seiketsu (limpieza) | → | LIMPIEZA EN LA EJECUCIÓN |
| • Shitsuke (disciplina) | → | RESPETO PROCEDIMENTAL |

2.8. COSTE DEL MANTENIMIENTO

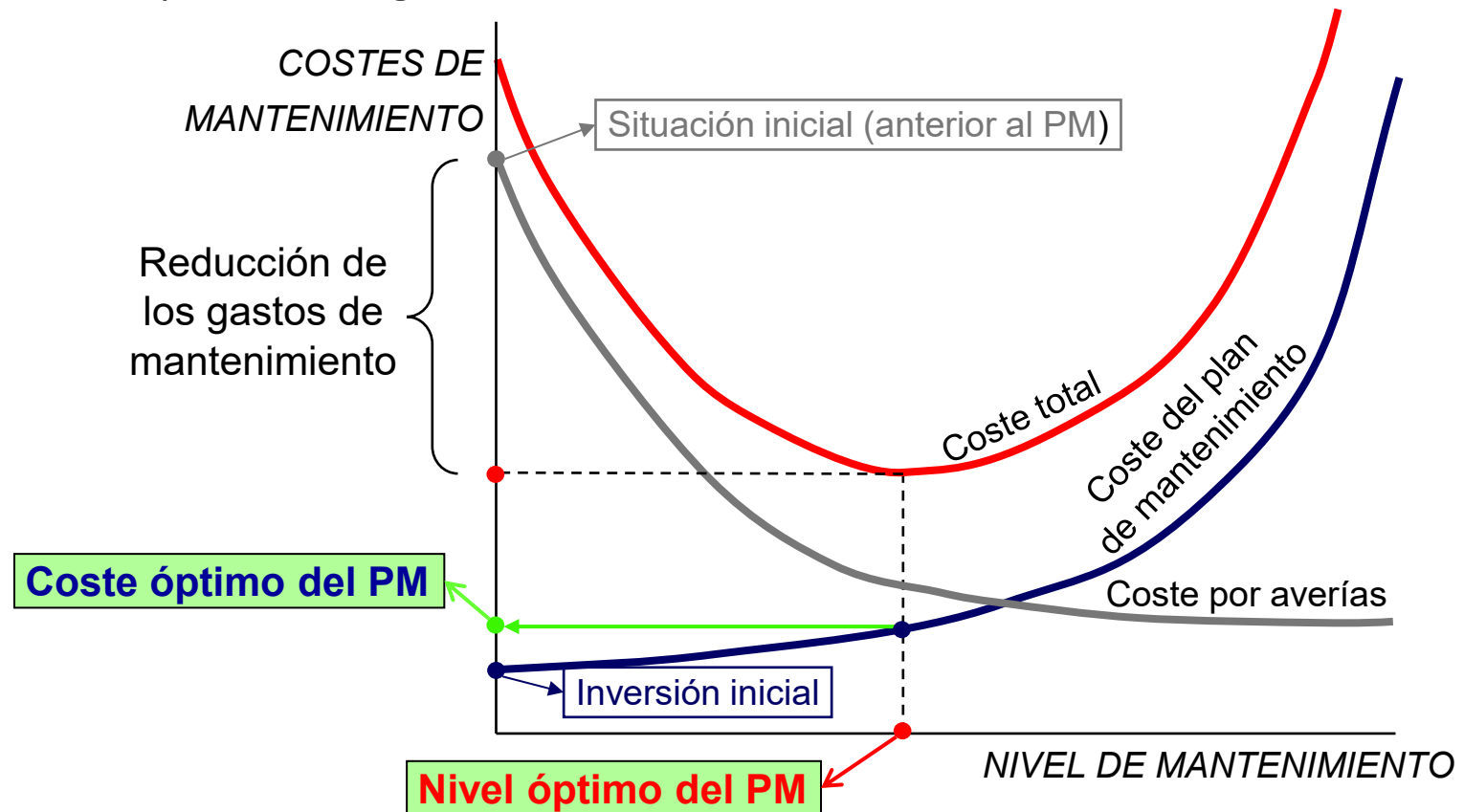
- Para determinar cuál es la inversión requerida para implantar un plan de mantenimiento, acorde con las necesidades de la instalación, deben realizarse previamente las siguientes averiguaciones:
 1. Lista total de averías reparadas, incluyendo los medios materiales y repuestos utilizados, medios de transporte y recursos humanos.
 2. Detalle de los tiempos de reparación.
 3. Coste de cada una de las reparaciones, detallando los repuestos, materiales auxiliares, transportes y horas/hombre.
 4. Relación de daños ocasionados por cada fallo o parada.
 5. Estimación de las pérdidas derivadas de la parada o disminución de la producción.
- Esta información debe venir referida a un periodo de tiempo suficientemente representativo, generalmente un año o más.
- Además, existe otro conjunto de datos cuya valoración exacta no puede realizarse por no haberse presentado nunca, pero de los que puede hacerse una estimación. Tales son las pérdidas derivadas por ciertas averías o fallos imprevistos de equipos que son críticos para la producción o para la seguridad de la instalación.

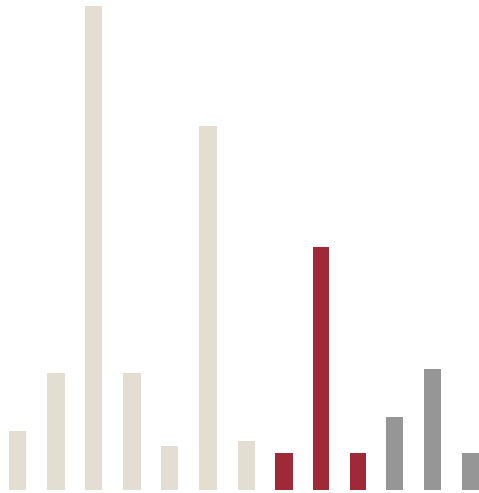
2.8. Coste del mantenimiento

- En segundo lugar, la valoración de los costes producidos por los fallos, más los derivados por improducción, permite establecer un límite aproximado de la inversión requerida para implantar el plan de mantenimiento.
- Los gastos necesarios para poner en marcha un plan de mantenimiento pueden dividirse en las siguientes partidas:
 1. Coste de la instrumentación, instalaciones y equipamiento necesario.
 2. Coste de las modificaciones pertinentes en los equipos y en la instalación existente.
 3. Coste del personal encargado de realizar la instalación del plan.
 4. Coste de la integración del plan de mantenimiento en la estructura de la producción.
 5. Preparación y adiestramiento del personal encargado de ejecutar el plan.
 6. Coste del personal destinado a ejecutar el plan.
 7. Coste del mantenimiento del plan.

2.8. Coste del mantenimiento

- En la figura se muestra cómo al incrementar el nivel de mantenimiento efectuado a la planta evolucionan los costes del mantenimiento (aumentan) y los costes derivados de las averías y reparaciones (disminuyen). La suma de ambos representa el gasto total en mantenimiento.





TEMA 3

BASES PARA EL DISEÑO DE UN PLAN DE MANTENIMIENTO

Ingeniería del Mantenimiento Industrial



ÍNDICE

3.1. Generalidades

3.2. Fases del diseño de un PM

3.2.1. Estudio Preliminar

3.2.2. Análisis de criticidades

3.2.3. Determinación del alcance económico y estratégico

3.2.4. Diseño del sistema de gestión del mantenimiento

3.2.5. Planificación y desarrollo de procedimientos

3.2.6. Estudio de los mecanismos de control y evaluación

3.2.7. Proyecto de implantación del PM

3.2.8. Descripción de los procedimientos de actualización

3.1 GENERALIDADES

- No existen dos planes de mantenimiento iguales.
- En cada caso existen distintas circunstancias, tales como:
 - El tipo de actividad
 - La ubicación de las plantas
 - Las características de los equipos estáticos y dinámicos
 - La dispersión de las instalaciones
 - La política de empresa
 - Las posibilidades de asistencia técnica
 - La cualificación del personalque exigen un diseño particularizado.
- El resultado final será, por tanto, distinto en cada caso.

3.1 Generalidades

- El plan de mantenimiento (PM) diseñado deberá dar respuesta a todos los aspectos del mantenimiento de las instalaciones, entre otros:
 - El tipo de mantenimiento a aplicar a cada uno de los equipos
 - El alcance de las intervenciones
 - Los procedimientos concretos de actuación
 - La organización y temporalización de las actividades
 - La organización del personal de mantenimiento
 - Los medios e infraestructuras necesarias
 - La gestión de Órdenes de Trabajo
 - La gestión y mantenimiento del Plan
 - Los procedimientos de control y evaluación del mantenimiento

3.2 FASES DEL DISEÑO DE UN PM

- El diseño de un PM consta de las siguientes fases:
 1. Estudio Preliminar
 2. Análisis de criticidades
 3. Determinación del alcance económico y estratégico
 4. Diseño del sistema de gestión del mantenimiento
 5. Planificación y desarrollo de procedimientos
 6. Estudio de los mecanismos de control y evaluación
 7. Proyecto de implantación del PM
 8. Descripción de los procedimientos de actualización

3.2.1. Estudio Preliminar

- Tiene por finalidad recabar toda la información que permita conocer, para cada una de las actuaciones a definir en el PM:
 - Su justificación (*¿Es necesario o conveniente?*)

Principalmente por razones de tipo económico y de seguridad de las instalaciones.
 - Su viabilidad (*¿Es posible abordarlo y llevarlo a cabo?*)

En determinadas ocasiones no es posible realizar ciertas actuaciones por diferentes causas relacionados con el mantenimiento de los equipos: indisponibilidad de recursos humanos y materiales, limitaciones contractuales, periodos de garantías, restricciones físicas o geográficas, etc.
 - Su oportunidad (*¿Es ahora el mejor momento?*)

Entendida como la coyuntura para poder abordar y llevar a cabo las actuaciones de mantenimiento necesarias en un momento y circunstancias concretos (cambios estructurales u organizativos, modificaciones del diseño, obras, disponibilidad de personal cualificado, contratación o redistribución de operarios, etc.).

3.2.1. Estudio Preliminar

- El estudio preliminar debe comprender:
 - Una revisión completa del proceso productivo
 - Un inventario de todos los elementos que componen la instalación
 - Un estudio de las características técnicas de todos los equipos e instalaciones
 - Un análisis del sistema de gestión de los datos de equipos e instalaciones
- Es recomendable recoger toda esta información en una Base de Datos organizada jerárquicamente, de tal modo que, además de archivar los datos referentes a cada activo, se puedan establecer las dependencias funcionales entre éstos.

3.2.1. Estudio Preliminar

- En la base de datos deberán recogerse todos los datos que puedan ser relevantes para el PM, tales como:
 - Especificaciones de diseño del equipo
 - Otros datos descriptivos relevantes del equipo: dimensiones, limitaciones, tolerancias, materiales, etc.
 - Tipo de equipo/máquina.
 - Marca y modelo.
 - Código interno.
 - Fabricante.
 - Distribuidor (o distribuidores).
 - Fecha de adquisición.
 - Sistemas auxiliares necesarios.
 - Sensores/Instrumentación incorporada al equipo.
 - Documentación de averías producidas y reparaciones efectuadas (Historial).
 - Adjuntar documentación del equipo/máquina: manuales de fabricación y mantenimiento, revisiones, certificaciones, etc.
 - Otras observaciones complementarias

3.2.1. Estudio Preliminar

- Ejemplo de ficha de datos de un activo del inventario.

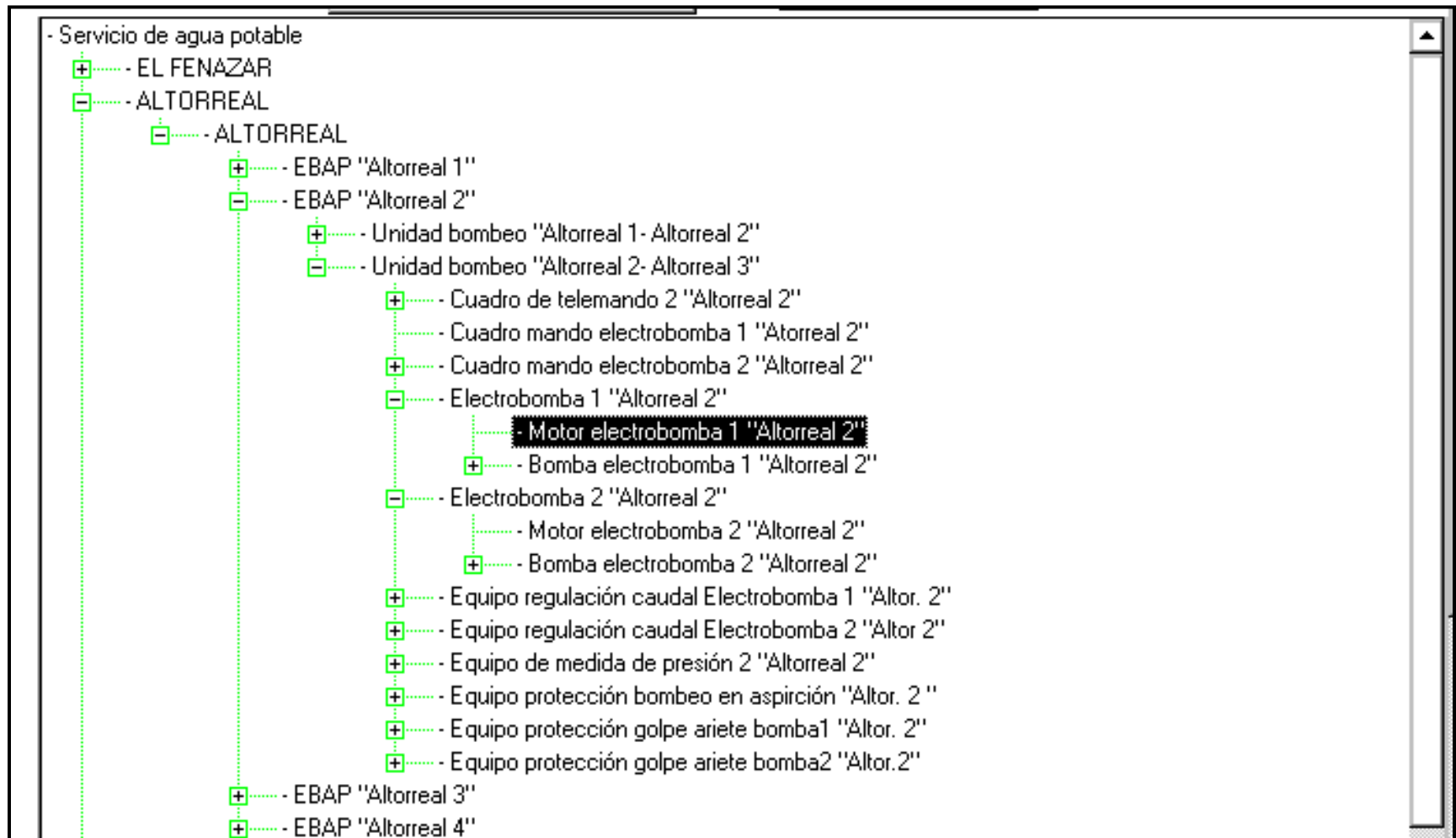
The screenshot shows a software window with two tabs: 'Características' (selected) and 'Mediciones realizadas'. The form contains the following fields and controls:

- Código Interno:** Text box with 'ERF-M008'.
- Nombre:** Text box with 'Motor G MB1sumergido EDAR "El Fenazar"'.
- Tipo:** Dropdown menu with 'Máquina' selected.
- Familia:** Dropdown menu (empty).
- Descripción:** Large empty text box.
- Fabricante:** Text box with 'HYDREUTES S.A.'.
- Marca:** Text box with 'HYDREUTES/ROBOT'.
- Modelo:** Text box with 'RW-2110-BB-V'.
- Fecha Adquisición:** Text box (empty).
- anteriorA:** Text box (empty).
- Estado General:** Dropdown menu with '5' selected.
- Aislamiento:** Dropdown menu (empty).
- CLASE F:** Text box (empty).
- Registro:** Navigation controls showing '1' of '8' records.
- Observaciones:** Text box with 'Grupo motobomba1 sumergida impulsión EDAR "Fenazar"'.

At the bottom of the window is a row of navigation buttons: back, previous, next, forward, search, and save.

3.2.1. Estudio Preliminar

- Ejemplo de estructura jerárquica de los activos de un inventario.



3.2.2. Análisis de criticidades

- Detectar los puntos débiles del proceso productivo, en lo que se refiere al uso de los equipos e instalaciones, es fundamental para orientar correctamente las actuaciones a llevar a cabo y priorizar las tareas de mantenimiento.
- Tomando como punto de partida la información recabada en el Estudio Preliminar, deberá determinarse la importancia que para el proceso productivo tiene cada uno de los activos a mantener. La información relevante dependerá del caso en análisis, pero pueden ser datos relevantes: la fiabilidad de los equipos, el coste de las reparaciones, el coste de la indisponibilidad, etc.
- Se trata, por tanto, de establecer la ***criticidad*** de cada uno de los equipos analizados.
- Esto dará una prelación a seguir en cuanto a las consecuencias del fallo de cada equipo y, por consiguiente, de las necesidades relativas en materia de mantenimiento para cada uno de ellos.

3.2.3. Determinación del alcance

- El balance anual de costes por averías e indisponibilidad, con anterioridad a la puesta en marcha del PM, constituye una cota superior a la inversión anual que puede preverse en el plan de mantenimiento, incluyendo los costes de amortización de la inversión inicial para el mismo.
- El coste anual previsto en mantenimiento es fundamental para determinar la estrategia de mantenimiento más rentable.
- Conocer las criticidades de los equipos no es suficiente para determinar la estrategia a seguir, pero constituye la referencia básica para concretar el tipo y grado de mantenimiento que se aplicará a cada equipo. En definitiva, cómo deben distribuirse los recursos disponibles para mantenimiento.
- Esta etapa, por tanto, define la política estratégica en materia de mantenimiento que aplicara la empresa:
 1. Se fijan los recursos destinados a mantenimiento.
 2. Se distribuyen en actividades concretas de mantenimiento sobre la relación priorizada de los equipos según su criticidad.

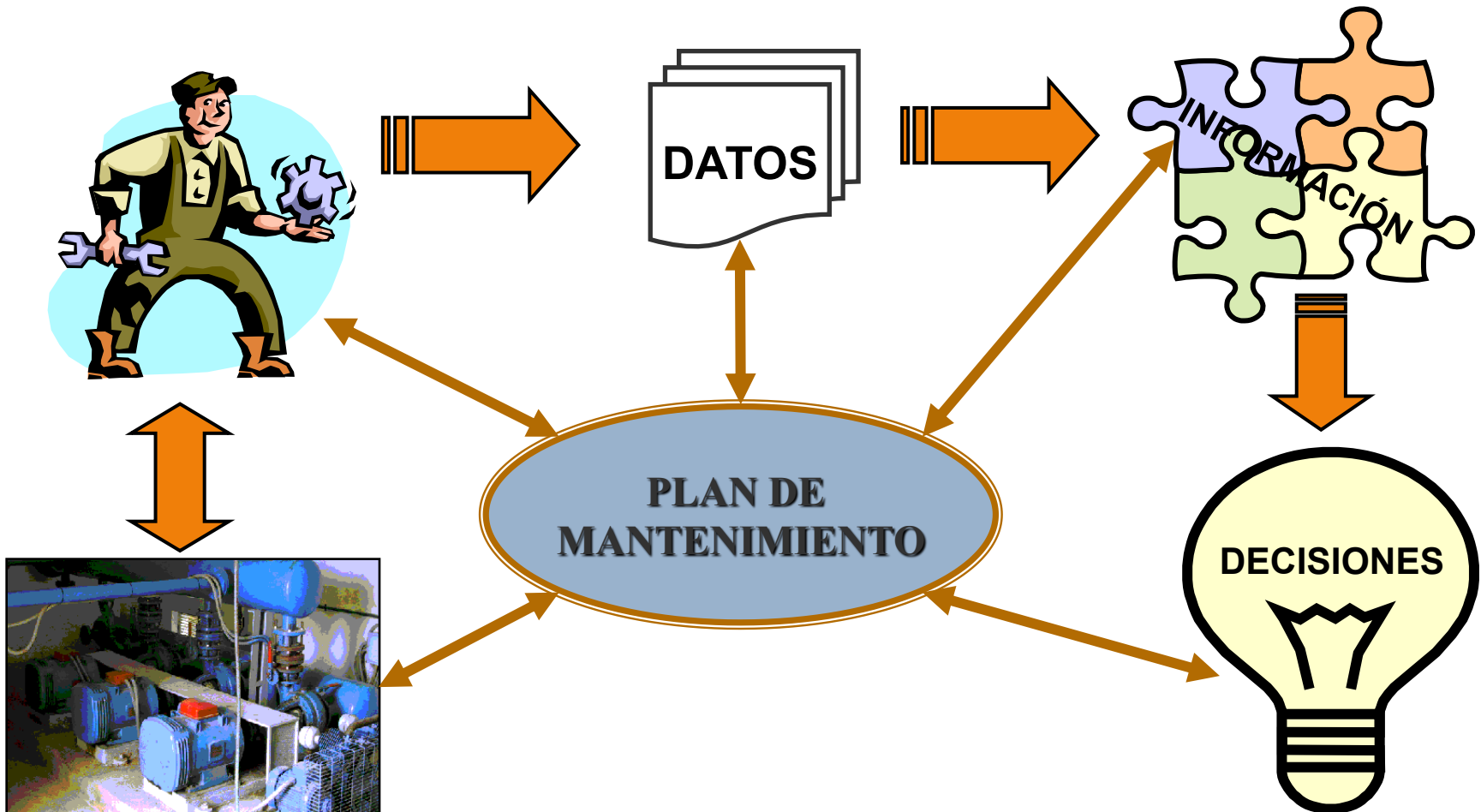
3.2.4. Sistema de gestión del mantenimiento

- Un sistema de gestión eficaz, dinámico y, sobre todo, capaz de hacer útil toda la información disponible debe apoyarse en alguna herramienta informática de Gestión del Mantenimiento Asistido por Ordenador (*GMAO*)¹.
- Cuanto mayor es la complejidad técnica, la variedad de equipos y la dispersión de las instalaciones en mayor medida se hace necesario contar con este tipo de herramientas.
- Un sistema informático de gestión del mantenimiento bien concebido permite a todos los niveles de la empresa implicados disponer en cualquier momento de toda la información necesaria para cada actuación.
- Es fundamental elegir correctamente la herramienta informática a utilizar. Un sistema bien concebido permitirá aplicar fácilmente el sistema informático a la realidad del PM necesario y, en última instancia a las necesidades de cada empresa.

¹ En inglés *CMMS*: " Computer Maintenance Management Software".

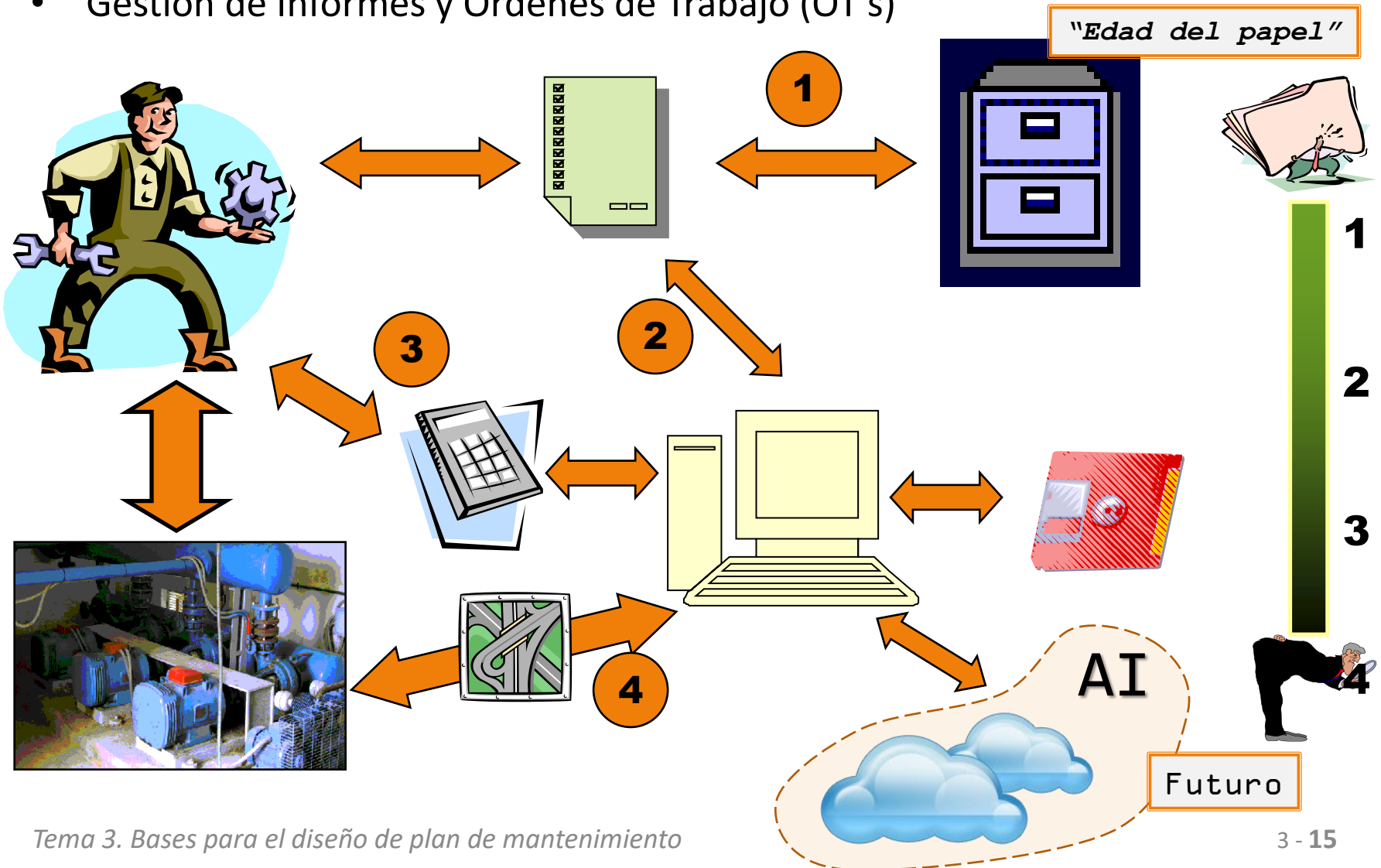
3.2.4. Sistema de gestión del mantenimiento

- Gestión de la información



3.2.4. Sistema de gestión del mantenimiento

- Gestión de Informes y Órdenes de Trabajo (OT's)



3.2.5. Planificación y desarrollo procedimental

- La planificación de un PM debe abarcar los siguientes aspectos:
 - Conjunto específico de operaciones de mantenimiento para cada equipo.
 - Designación de los puntos de medida de cada uno de los equipos e instalaciones conforme a su estructura jerárquica.
 - Descripción detallada de los protocolos a seguir en cada una de las operaciones.
 - Estructuración de operaciones elementales en procedimientos de mantenimiento más amplios.
 - Secuencia de ejecución de las operaciones.
 - Forma de gestión de la información.
 - Definición de las características de las órdenes de trabajo.
 - Definición de las características de los informes de inspección y reparación.
 - Funciones asignadas al personal encargado de ejecutar el plan.
 - Necesidades previstas de almacén de mantenimiento
 - Tareas que van a externalizarse y con quién o quiénes se contratará cada servicio.
 - Toda aquella información que sea relevante en cada caso concreto.

3.2.5. Planificación y desarrollo procedimental

- Al igual que en la ficha de datos de los activos, cada operación de que se defina en el plan de mantenimiento deberá venir reflejada en el software de gestión.
- La ficha correspondiente a una operación debe contener, entre otros, los siguientes datos:
 - Nombre y código interno de la operación
 - Tipo genérico de operación de que se trata (revisión, reparación, medida, ...)
 - Activos sobre los que se debe (o puede) realizarse.
 - Breve descripción de la finalidad de la tarea
 - Protocolo de la actuación
 - Medidas de seguridad a adoptar
 - Recursos necesarios
 - Tiempo medio requerido
 - Quién debe realizarla y si necesita autorización o supervisión
 - Etc.

3.2.5. Planificación y desarrollo procedimental

- Ejemplo de un procedimiento de mantenimiento (1/3)

N° DE GAMA:	EB-6	TIPO DE MANTENIMIENTO:	Preventivo
DESCRIPCIÓN:	Cambio de aceite en electrobomba sumergible		
EQUIPO (S):	Electrobombas sumergibles		
FRECUENCIA:	<u>Equipos en R1 con técnicas predictivas del estado del aceite y en cualquier otro cuando se estime necesario.</u> Por diagnóstico <u>Otros equipos en R1 y R2:</u> Lo que antes se produzca de los dos valores siguientes: 1. Por contador Cada 1500 horas de funcionamiento 2. Por calendario Cada 4 meses		
OBSERVACIONES:	Los periodos de revisión son orientativos. En determinados equipos, que funcionan en condiciones muy severas, es conveniente reducir el periodo a 1000 horas, o incluso menos. La experiencia concreta con cada equipo deberá ser el referente definitivo de su propio procedimiento.		
PERSONAL:	Operario de mantenimiento		

3.2.5. Planificación y desarrollo procedimental

- Ejemplo de un procedimiento de mantenimiento (2/3)

PROCEDIMIENTO:	Genérico
Medios utilizados: Herramientas de uso habitual. Lubricante (Densolina aa de Brugarolas) Desoxidante en spray Medidas de seguridad: • Utilizar el material de protección personal necesario (calzado, casco, guantes, etc.). • Evitar ropas holgadas, cadenas, anillos, pulseras u objetos metálicos que puedan ser motivo de que alguien resulte atrapado o que pudieran servir de masa y, por tanto, motivo de descargas eléctricas. • Asegurarse en el cuadro o mando local correspondiente que el motor no puede arrancarse fortuitamente. • Señalizar en el cuadro que hay personal trabajando. • Comprobar la inexistencia de elementos móviles en la zona de intervención, aislarlos si los hubiere. • Evitar la existencia de suciedad o líquidos que pudieran dar lugar a piso resbaladizo. • Proteger las piezas del equipo que vayan siendo desmontadas, disponer de un recipiente. • Procurar señalar aquellas partes del equipo que se puedan prestar a equívocos con lápiz indicador o etiquetas. • Evitar colocarse debajo de cualquier elemento en suspensión, y procurar no realizar nunca en solitario una intervención de mantenimiento que entrañe cierto peligro. • Comprobar que no hay tensión en las bornas del motor con el polímetro (380 V).	

3.2.5. Planificación y desarrollo procedimental

- Ejemplo de un procedimiento de mantenimiento (3/3)

Precauciones previas:

La potencia consumida por la bomba aumenta una vez abierta la válvula de impulsión.

Cerrar la válvula de impulsión hasta conseguir la altura de impulsión deseada.

Protocolo:

1. Inspeccionar visualmente que no existen anomalías en el equipo antes de la parada. Se prestará atención a cualquier ruido anómalo que se produzca.
2. Parar el equipo, señalizar y, si es posible, enclavar la desconexión. Para parar el equipo:
 1. Cerrar la válvula de impulsión y seguidamente parar el motor.
 2. En caso de peligro de inundación, cerrar la válvula de aspiración después de parar la bomba.
3. Cambiar el aceite. Para llevar a cabo el llenado de aceite se procederá como sigue:
 1. Girar el regulador de nivel aceite.
 2. Llenar la parte fija inferior y la parte superior transparente del regulador de nivel de aceite hasta el nivel indicado y girarlo a su posición primitiva.
 3. Comprobar que la bomba gira en el sentido de rotación adecuado.
 4. Para válvulas que tienen cierta altura para aspirar, la tubería de aspiración debe llenarse antes de la puesta en marcha.

3.2.6. Mecanismos de control y evaluación

- Todo activo tiene un ciclo de vida útil.
- El mantenimiento intenta disminuir el coste del ciclo de vida (*LCC*) de los activos a través de la mejora de:
 - Su **Fiabilidad** *extrínseca* → retardando el fallo y alargando su vida
 - Su **Mantenibilidad** → disminuyendo los costes de reparación
- Los índices que permiten controlar la evolución del mantenimiento son: *Fiabilidad y Mantenibilidad*.
- La **Disponibilidad** es un parámetro que engloba a los dos anteriores y permite controlar el estado de un activo durante su periodo funcional.
- Los índices principales que permiten evaluar globalmente el efecto del mantenimiento son la *Disponibilidad* y el *LCC*
- El fin del ciclo de vida de un activo, se caracteriza por una continuada disminución de su disponibilidad y un aumento del coste de su mantenimiento.

3.2.7. Implantación del PM

- La puesta en marcha del PM puede organizarse de forma gradual.
- El proyecto de implantación debe, por tanto, incluir una temporalización de la puesta en marcha de las diferentes actuaciones del PM.
 - Por ejemplo, un escalonamiento de las actuaciones en lo referente a:
 - El conjunto de equipos implicados en cada una de las fases
 - El tipo de mantenimiento a realizar
 - El número de técnicos y operarios encargados de ejecutar el plan recurriendo inicialmente, si es posible, a horas extraordinarias o a la externalización de tareas que posteriormente podrían ser asumidas por el personal propio.
- Las tareas que se realizan de forma muy esporádica, para las que no se dispone de personal cualificado, es preferible externalizarlas.
 - Por ejemplo: Para el diagnóstico avanzado de fallos en los equipos o instalaciones es aconsejable recurrir a especialistas, servicios técnicos o al propio fabricante.

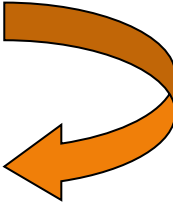
3.2.8. Procedimientos de actualización

- Un PM no debe seguir un programa rígido.
- Existen numerosas causas que justifican determinados cambios del PM inicialmente diseñado:
 - Cambios en las instalaciones
 - Modificaciones contractuales o normativas
 - Nueva legislación
 - Cambios en la política de empresa
 - Nuevos desarrollos tecnológicos
 - Cambios en los balances de costes de mantenimiento
 - Imprevistos, etc.

La adecuación del PM a cada coyuntura debe ser objeto continuo de revisiones del plan con el fin de efectuar las actualizaciones necesarias.

3.2.8. Procedimientos de actualización

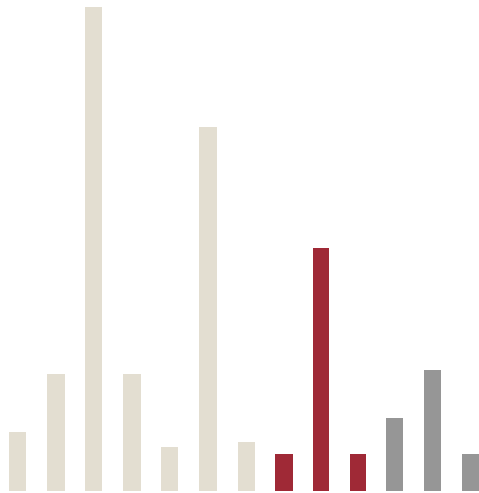
- En lo que se refiere a las operaciones y procedimientos, debe establecerse un protocolo de actualizaciones que se extienda a aquellos cambios que vayan surgiendo como consecuencia de:
 - La modificación de procedimientos ya establecidos.
 - La inserción de nuevas operaciones o procedimientos
- Debe también preverse la posibilidad de tener que adecuar el soporte de la información a los cambios que se vayan produciendo, ya sea a la vista de las nuevas necesidades o por decisiones de empresa.



EXPORTABILIDAD DE LAS BASES DE DATOS

+

SISTEMAS DE GESTIÓN DEL CONOCIMIENTO



TEMA 4

MECANISMOS DE FALLO

Ingeniería del Mantenimiento Industrial



UNIVERSIDAD DE
MURCIA

ÍNDICE

- 4.1. Introducción
- 4.2. Clasificación de los fallos
- 4.3. Planteamientos ante cada tipo de fallo
- 4.4. Estado de un sistema
- 4.5. Evolución del fallo
- 4.6. Probabilidad de fallo
- 4.7. Tasa de fallos
- 4.8. Curva de bañera

4.1. INTRODUCCIÓN

- La posibilidad de fallo es consustancial a cualquier máquina, producto o proceso.
- El planteamiento de considerar el fallo como “*una desgracia sobrevenida*”, no sólo es ignorar la propia naturaleza de los sistemas físicos, sino exponerse a los avatares de sus efectos.
- Puesto que el fallo potencial “nace” con cada sistema y, por tanto, con su diseño, debe prevenirse su aparición.
- Se entiende por **fallo** de un sistema:

La falta o deficiencia de algo que le es propio o se le atribuye, de tal modo que su función no se realiza como se esperaba.



- Rotura
- Cese operativo
- Límite funcional
- Pérdida de calidad

4.2. CLASIFICACIÓN DE LOS FALLOS

Pueden establecerse diferentes clasificaciones de los fallos, atendiendo a diversos criterios. Citaremos algunas de las más relevantes.

- Atendiendo al **modo de aparición y desarrollo**, el fallo puede ser:
 - *Progresivo (Gradual o Paramétrico)*
 - *Repentino (o Súbito)*

El fallo **progresivo** es consecuencia del deterioro gradual de las características propias de algún componente del sistema.

Este deterioro suele venir acompañado de la modificación en el estado o valor de ciertos parámetros. Si dichos parámetros pueden ser observados o medidos, se tendrá una manifestación de la existencia del fallo.

Ejemplos: Fatiga en rodamientos, corrosión, suciedad, fuga leve de lubricante, etc.

4.2. Clasificación de los fallos

Se produce un fallo **repentino** cuando la evolución hacia el fallo no puede ser detectada de ninguna forma, por lo que cuando éste se presenta lo hace de forma inesperada.

Este tipo de fallos tiene muchas veces un origen aleatorio.

Ejemplos: descargas eléctricas, obturaciones, efectos indirectos de otro fallo, errores humanos, etc.

A veces, se deben al desgaste o a la fatiga de elementos no visibles y generalmente estáticos.

Ejemplos: Grietas en la carcasa, rotura de muelles, vibraciones en bridas o juntas de tuberías, etc.

En otros casos, la causa puede ser un defecto inicial del elemento, ya sea por error de fabricación o por un montaje incorrecto.

Ejemplos: impurezas en el material, fractura no visible, debilidad estructural, tratamiento térmico incorrecto, etc.

4.2. Clasificación de los fallos

- Atendiendo a la **dimensión del fallo** o a su efecto sobre el proceso:
 - *Parcial (o Incompleto)*
 - *Total (o Completo)*

Un fallo ***parcial*** no supone la parada del equipo o del proceso afectado, aunque sí afecta a las características funcionales del proceso, condiciona su régimen funcional, disminuye la seguridad operativa o merma su capacidad productiva.

Ejemplos: Suciedad en filtros (disminución de caudal), fallo en una bujía, desgaste en álabes, pérdida de filo en herramientas de corte, etc.

Un fallo ***total*** provoca la parada inmediata del sistema afectado. Es, sin lugar a dudas, el tipo de fallo que debe evitarse.

Ejemplos: Fusión de las bolas de un rodamiento, gripado de un motor por pérdida de lubricación , etc.

Un fallo total que, además, sea repentino, suele denominarse *Cataléptico*.

Ejemplos: Corte de alimentación eléctrica a un motor, fusión del filamento de una lámpara, rotura de la correa de la distribución de un automóvil , etc.

4.2. Clasificación de los fallos

- Atendiendo al **momento** en el que se produce el fallo, puede ser:
 - *Infantil*
 - *Por envejecimiento*
 - *Aleatorio*

El fallo ***infantil*** se produce en la primera etapa de vida de un elemento o proceso. Suele deberse a imperfecciones constructivas, a un ensamblaje defectuoso, a una instalación incorrecta del equipo o a un uso inapropiado del mismo.

El fallo ***por envejecimiento***, es el tipo de fallo que no debería producirse nunca de forma inesperada, puesto que es consecuencia del deterioro progresivo y natural de los distintos componentes del sistema.

Para cada elemento deberá estimarse su periodo de vida útil, transcurrido el cual, el elemento en cuestión deberá ser reemplazado o, cuanto menos, deberá estrecharse su vigilancia, con el fin de evitar una evolución rápida hacia estados degenerativos peligrosos para la seguridad o para la operatividad del sistema.

4.2. Clasificación de los fallos

Dentro de este tipo también se incluyen aquellos defectos debidos a la acumulación de suciedad en elementos móviles, a la pérdida paulatina de lubricante, a las fugas producidas en el fluido refrigerante o al desajuste o soltura gradual en elementos de fijación, entre otros. Del mismo modo, deberá estimarse el periodo operativo antes de la intervención necesaria para restablecer las condiciones operativas del elemento o del sistema.

El fallo **aleatorio** no está relacionado directamente con la vida del elemento, es decir, no puede achacarse a su desgaste ni a causas infantiles. Se produce por azar, y su aparición, por tanto, sólo puede preverse mediante modelos estadísticos.

- Atendiendo a la **duración** del fallo:

- *Estable*
- *Pasajero*
- *Intermitente*

Fallo **estable** es aquel que una vez que ha aparecido sólo puede eliminarse procediendo a la reparación o sustitución del sistema afectado.

4.2. Clasificación de los fallos

Por el contrario, en el fallo **pasajero**, que generalmente tiene un origen de carácter aleatorio, una vez concluida la causa que lo originó, éste desaparece por sí solo, sin necesidad de intervención de ninguna clase.

Ejemplos: obturaciones pasajeras en conductos, defectos del producto en proceso (humedad, impurezas, etc.), caídas de tensión, etc.

El fallo intermitente generalmente está asociado con ciertas características repetitivas en el proceso. Se trata, por tanto, de un fallo pasajero provocado por circunstancias no aleatorias.

Ejemplos: alteraciones del régimen funcional, regímenes transitorios (arranques o paradas), cambios de temperatura, origen de la materia prima, etc.

- Atendiendo al **origen** del fallo:

- *Directo*
- *Indirecto*

Se dice que se ha producido el fallo **directo** de un elemento cuando el origen del fallo está en el propio elemento.

Por el contrario, será **indirecto** si es consecuencia de alguna circunstancia ajena al elemento que acaba fallando.

Ejemplos: vibración de máquinas próximas, sobretensiones, sobrepresiones, etc.

4.2. Clasificación de los fallos

- Atendiendo a la **posibilidad de reparación** del elemento que ha fallado:
 - *Reparable*
 - *No reparable*

Si bien en el primer caso, mediante la reparación, pueden restituirse sus correctas condiciones operativas, en el segundo es preciso reemplazarlo.
- Atendiendo a la **información** que se tenga del fallo:
 - *Manifiesto*
 - *Oculto*

Se dice que un fallo es ***manifiesto*** cuando, una vez producido, se tiene constancia del mismo y, normalmente, se dispone de información acerca del origen del mismo.

Si existen mecanismos de detección y aviso, al fallo también se le llama *señalizado*.

Un fallo es ***oculto*** cuando no existen métodos para detectarlo, o bien éstos no se han puesto en práctica.

4.3. PLANTEAMIENTOS ANTE CADA TIPO DE FALLO

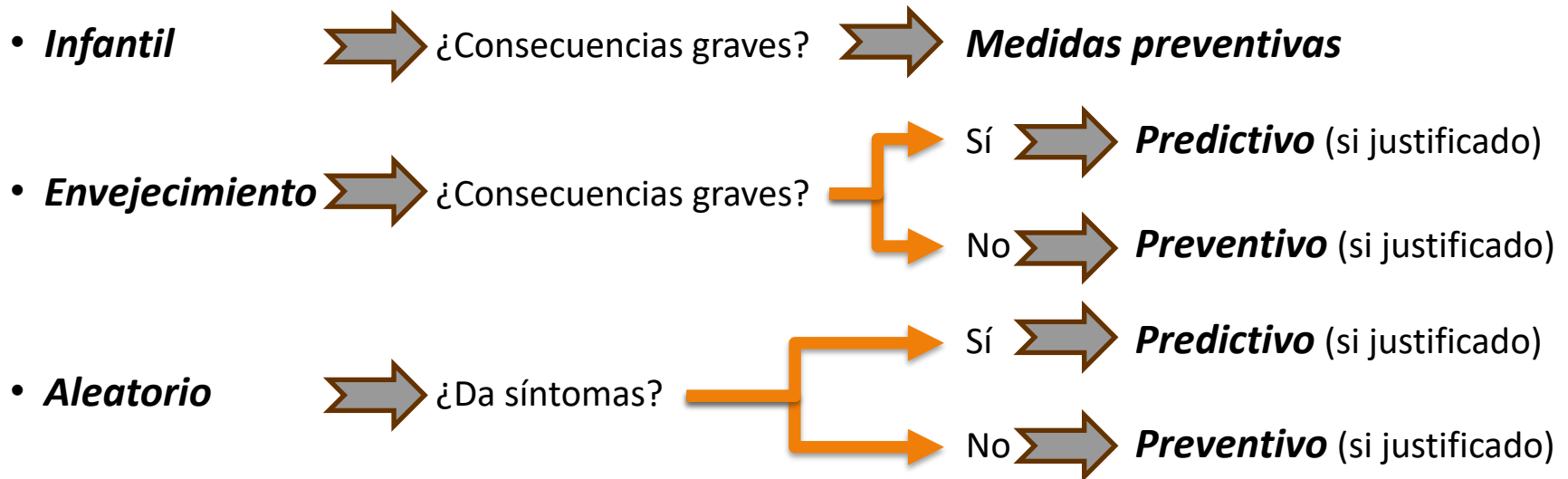
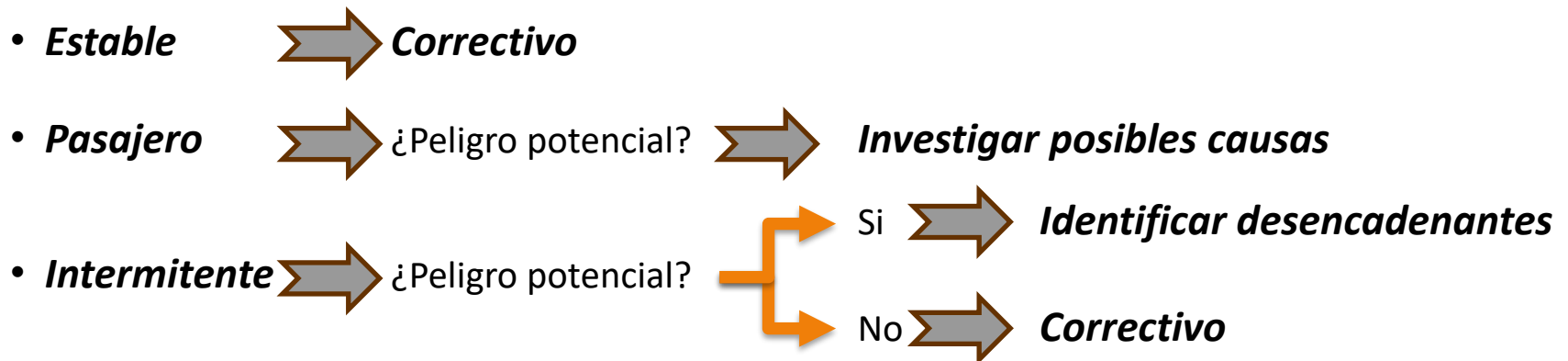
➤ Atendiendo al modo de aparición y desarrollo:

- **Progresivo** ➡ ¿Sensorizar síntomas? ➡ **Predictivo** (si está justificado)
- **Repentino** ➡ ¿Consecuencias graves? ➡ **Preventivo** (si está justificado)

➤ Atendiendo a la dimensión del fallo:

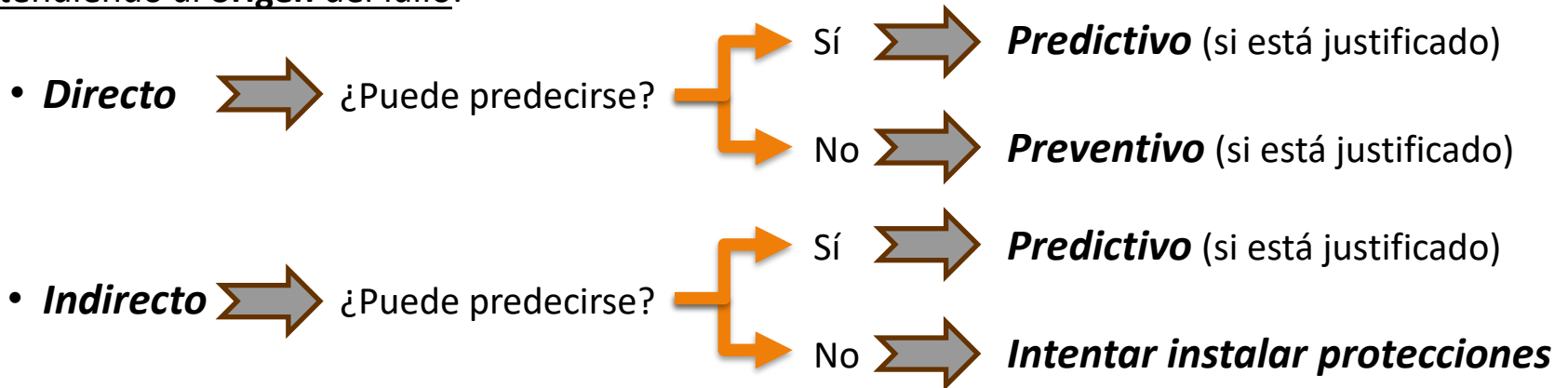
- **Parcial** ➡ ¿Activo crítico? ➡ **Mejorar nivel de mantenimiento**
- **Total** ➡ ¿Activo crítico? ➡ **Redundancia**

4.3. Planteamientos ante cada tipo de fallo

➤ Atendiendo al **momento** en el que se produce el fallo:➤ Atendiendo a la **duración** del fallo:

4.3. Planteamientos ante cada tipo de fallo

➤ Atendiendo al **origen** del fallo:



➤ Atendiendo a la **posibilidad de reparación**:

- **Reparable** ➡ **Prever procedimientos de reparación**
- **No reparable** ➡ **Prever repuestos**

➤ Atendiendo la **información** que se tenga del fallo:

- **Manifiesto** ➡ **Correctivo**
- **Oculto** ➡ ¿Consecuencias graves? ➡ **Medidas preventivas** (limitar consecuencias)

4.4. ESTADO DE UN SISTEMA

- Desde el punto de vista funcional, el elemento a estudio (equipo, máquina, sistema, etc.) puede encontrarse en alguno de los estados siguientes:

- ①.- Buen estado
- ②.- Estado degradado (defectuoso)
- ③.- Averiado (fallo del sistema)

- Existen, por tanto, 6 transiciones posibles entre estos tres estados, cada una de las cuales representa lo siguiente:

- T_{12} - Aparición de un defecto
- T_{21} - Corrección del defecto
- T_{13} - Aparición de un fallo repentino
- T_{31} - Eliminación del fallo (reparación)
- T_{23} - Evolución del defecto hasta el fallo del sistema
- T_{32} - Corrección parcial del fallo

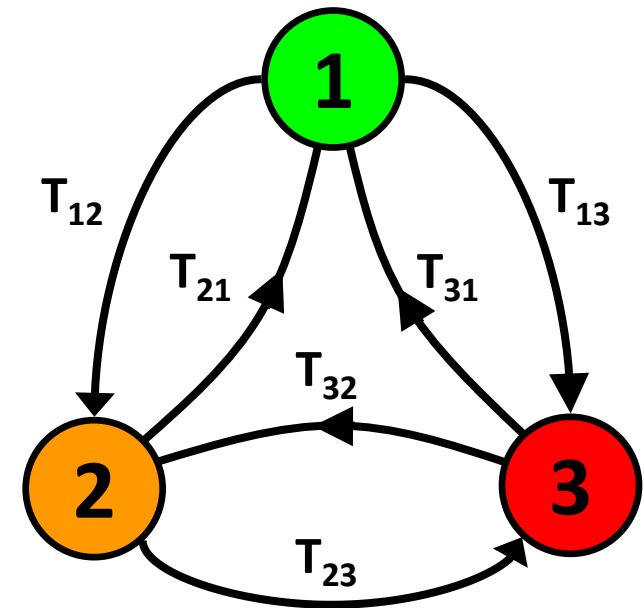
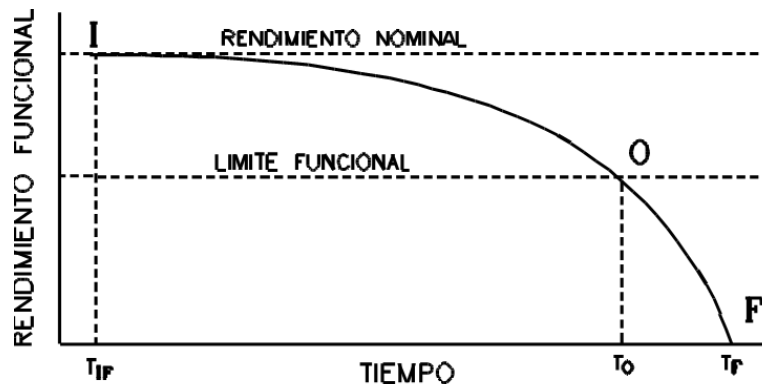


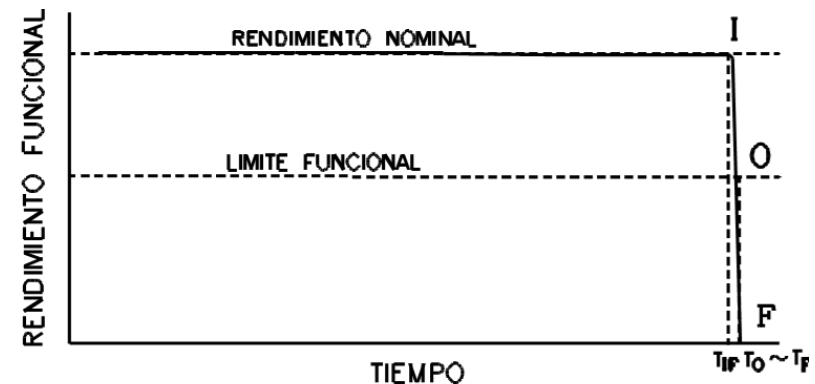
Figura 4.1. Estados de un sistema.

4.5. EVOLUCIÓN DEL FALLO

- A partir de una situación de *buen estado*, existen dos transiciones posibles hacia el fallo, cada una de las cuales sigue un proceso evolutivo diferente:
 - T_{12} supone una evolución gradual desde el buen estado hacia estados defectuosos, que desembocan finalmente (transición T_{23}) en el fallo, en lo que se denomina proceso degenerativo del sistema (figura 4.2.A).
 - T_{13} supone un cambio repentino hacia el fallo del sistema (figura 4.2.B), lo que se denomina proceso cataléptico



A) Proceso degenerativo.



B) Proceso cataléptico.

Figura 4.2. Evolución del fallo.

4.6. PROBABILIDAD DE FALLO

- La aparición de un fallo en cualquier sistema en un determinado instante de tiempo es algo que no puede preverse de forma exacta, sino que responde a la acción de múltiples variables de tipo aleatorio:
 - calidad de los componentes del sistema
 - condiciones de la instalación
 - calidad del montaje
 - interacción con otros sistemas
 - influencia de agentes externos
 - condiciones ambientales y operativas
 - régimen de carga
 - velocidad de envejecimiento de los materiales, etc.

4.6. Probabilidad de fallo

- Se trata, por lo tanto, de un fenómeno estocástico y, como tal, sólo puede estudiarse siguiendo métodos estadísticos. Es decir, es preciso disponer de grandes conjuntos de datos numéricos para obtener inferencias basadas en el cálculo de probabilidades.



4.6. Probabilidad de fallo

- La función que da la probabilidad de que se produzca un fallo antes de sobrepasar un tiempo dado, se denomina ***función de distribución de fallo, $F(t)$*** .
- La adopción de un determinado modelo matemático de función de distribución, que represente a la distribución real de fallos del sistema en estudio, dependerá del grado de ajuste de los datos reales con el modelo en cuestión.
- Cuanto más datos se tengan mejor podrá ajustarse el modelo a la realidad.
- Algunas de las funciones de distribución más utilizadas en el análisis de fallos son las que se exponen a continuación.

4.6. Probabilidad de fallo

Distribución Exponencial

Es una función de distribución continua, cuya densidad de probabilidad viene dada por la expresión:

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

siendo la función de distribución:

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

Se utiliza como modelo de sistemas insensibles al uso, es decir, el fallo no depende del instante de tiempo concreto. Por tanto, no están relacionados con fallos de tipo infantil ni con factores debidos al desgaste o envejecimiento (Figura 4.3).

4.6. Probabilidad de fallo

Distribución Normal

Es una función de distribución continua, cuya densidad de probabilidad viene dada por la expresión:

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\theta}{\sigma}\right)^2}$$

siendo la función de distribución:

$$F(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_0^t e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\theta}{\sigma}\right)^2} dt$$

donde θ es la media de la distribución y σ su desviación típica.

Se utiliza en aquellos sistemas en los que existe una estimación de su periodo de vida nominal y se supone un comportamiento gaussiano. Este es el caso de los elementos tales como rodamientos, lámparas, lubricantes, etc. (Figura 4.4).

4.6. Probabilidad de fallo

Distribución Logarítmico-Normal

Es una variante de la distribución Normal (figura 4.5), en la que pueden repetirse los mismos argumentos expuestos anteriormente. Su densidad de probabilidad viene dada por la expresión:

$$f(t) = \frac{1}{t\sigma'\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln t - \theta'}{\sigma'}\right)^2}$$

siendo la función de distribución:

$$F(t) = \frac{1}{\sigma'\sqrt{2\pi}} \int_0^t \frac{1}{t} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln t - \theta'}{\sigma'}\right)^2} dt$$

donde θ' y σ' son parámetros que son función de la media y la desviación típica de la distribución:

$$\theta = e^{\theta' + \frac{\sigma'^2}{2}} \quad ; \quad \sigma = \sqrt{(e^{\sigma'^2} - 1) \cdot e^{2\theta' + \sigma'^2}}$$

4.6. Probabilidad de fallo

Distribución Gamma

Es una función de distribución continua cuya densidad de probabilidad viene dada por la expresión:

$$f(t) = \frac{\lambda}{\Gamma(r)} (\lambda t)^{r-1} e^{-\lambda t}$$

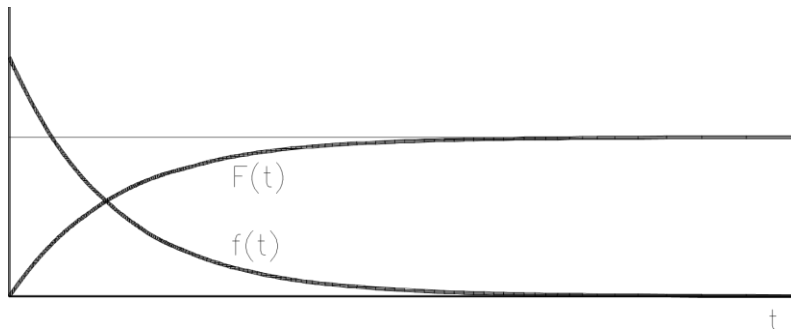
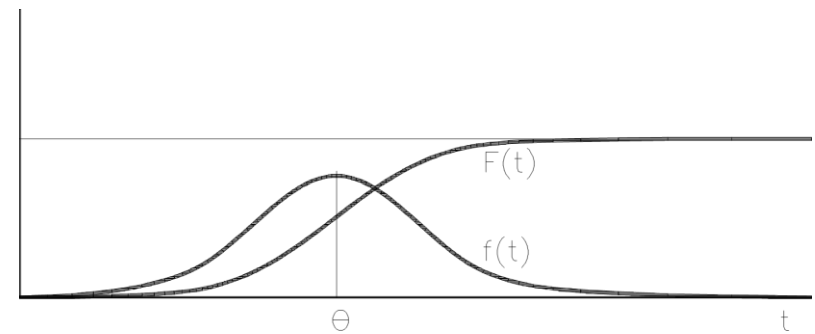
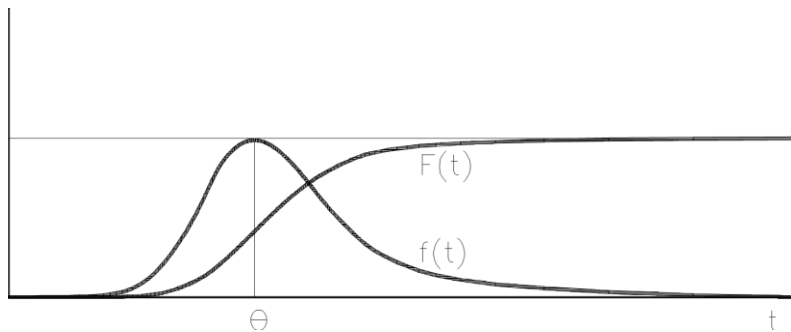
siendo la función de distribución:

$$F(t) = \frac{1}{\Gamma(r)} \int_0^t (\lambda t)^{r-1} e^{-\lambda t} dt$$

siendo $\Gamma(r)$ la función integral gamma de r: $\Gamma(r) = \int_0^\infty x^{r-1} e^{-x} dx = (r-1)!$

Esta distribución presenta una gran versatilidad, derivado de la posibilidad de elección del parámetro r, de manera que puede servir de modelo para caracterizar el comportamiento de muchos tipos de sistemas. Como caso particular, en el caso que $r=1$, la distribución gamma se convierte en una exponencial.

4.6. Probabilidad de fallo

**Figura 4.3.** Distribución exponencial**Figura 4.4.** Distribución normal**Figura 4.5.** Distribución logarítmico-normal

4.6. Probabilidad de fallo

Distribución de Rayleigh

Se utiliza para explicar los daños producidos por fatiga en los materiales y para prever los niveles de vibración de la maquinaria.

Su densidad de probabilidad viene dada por la expresión:

$$f(t) = \frac{t}{\mu^2} e^{\frac{-t^2}{2\mu^2}}$$

siendo la función de distribución:

$$F(t) = 1 - e^{\frac{-t^2}{2\mu^2}}$$

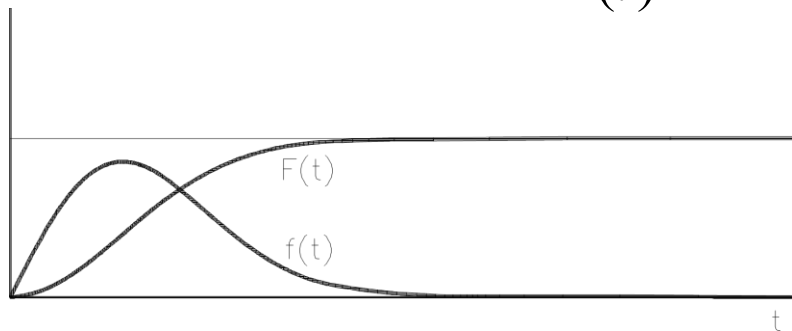


Figura 4.6. Distribución de Rayleigh

4.6. Probabilidad de fallo

Distribución de Weibull

Esta distribución fue propuesta por el ingeniero sueco W. Weibull, con motivo de sus estudios acerca del efecto de la fatiga sobre la vida de los metales. Posteriormente fue utilizada para explicar los fallos en el comportamiento de componentes electrónicos, y es actualmente de gran importancia en los estudios de fiabilidad (Figura 4.7).

La función de densidad de probabilidad es la siguiente:

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t - t_0}{\eta} \right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t-t_0}{\eta} \right)^\beta}$$

y la función de distribución correspondiente, que se obtiene integrando la densidad de probabilidad entre t_0 y t , es:

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-t_0}{\eta} \right)^\beta}$$

4.6. Probabilidad de fallo

Como puede observarse, la función de Weibull tiene tres parámetros variables:

- β , parámetro de forma;
- η , parámetro de escala;
- t_0 , origen de tiempos, a partir del cual está definida la función.

Esta función puede considerarse una generalización de un gran número de funciones de distribución. Por ejemplo:

- Para $\beta=1$, $\eta=1/\lambda$, $t_0=0$, se tiene la distribución Exponencial.
- Para $\beta=2$, $\eta=\sigma \sqrt{2}$, $t_0=0$, se tiene la distribución de Rayleigh.
- Con valores de β cercanos a 3'5 se aproxima a la distribución Normal.

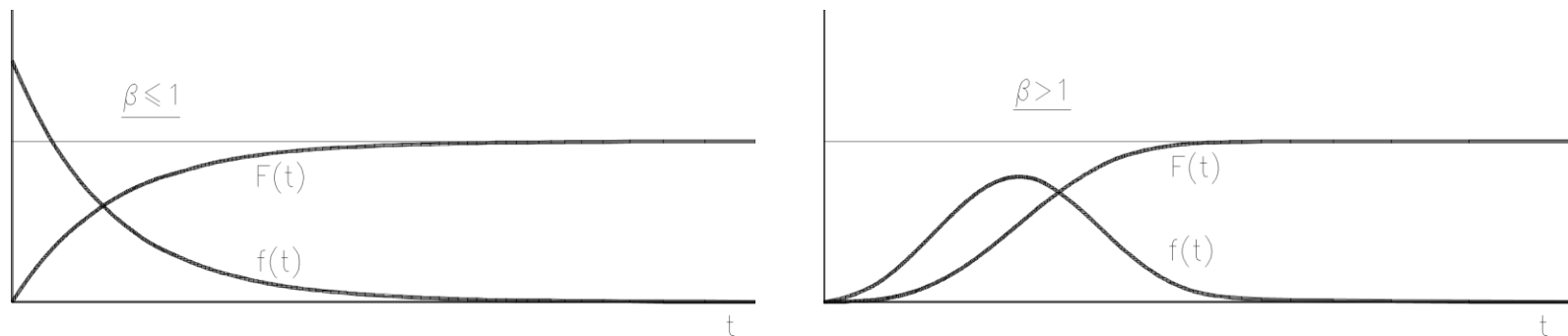


Figura 4.7. Distribución de Weibull.

4.7. TASA DE FALLOS

- Independientemente de la función de distribución, $F(t)$, que se tenga, ésta siempre indica la probabilidad de que se produzca un fallo en el intervalo de tiempo comprendido entre el origen de tiempos y el instante de tiempo, t , considerado.
- En multitud de ocasiones interesa conocer cuál es la evolución de los fallos a lo largo del tiempo.
 - Por ejemplo para establecer posibles relaciones con determinadas medidas adoptadas, o si saber si existen dependencias estacionales o coyunturales, etc.
- La **tasa de fallos** se define como:

Probabilidad de que se produzca el fallo en un determinado instante de tiempo, cuando hasta entonces aún no había fallado.
- Suele expresarse en términos de proporción de fallos por unidad de tiempo.

4.7. Tasa de fallos

- Cuando se conoce la función de distribución, la tasa de fallos viene dada por la expresión:

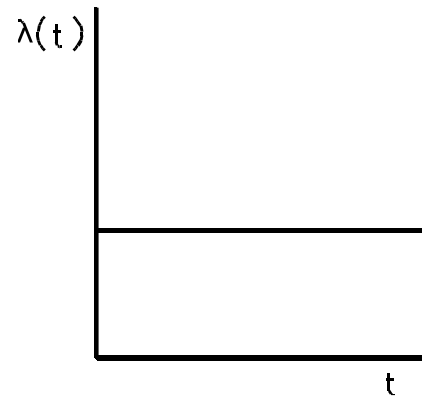
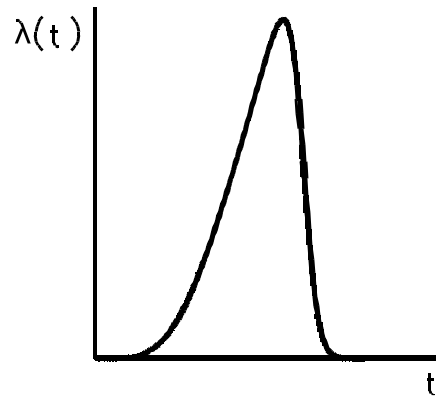
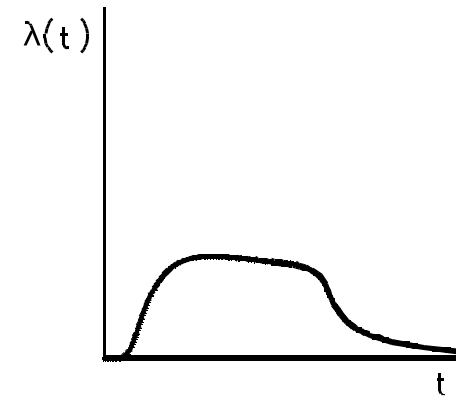
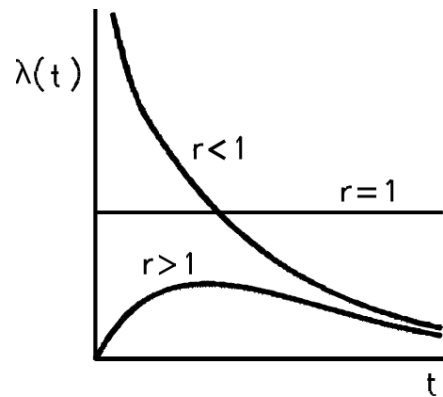
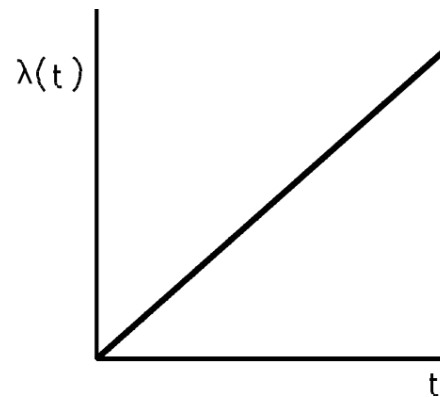
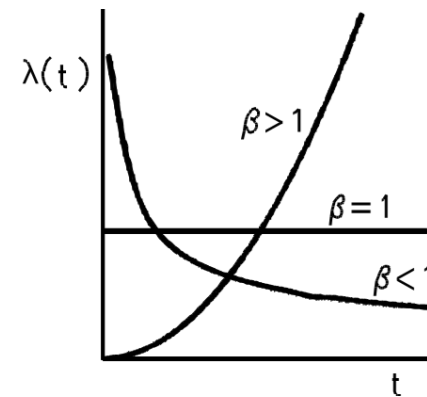
$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{1 - F(t)}$$

- Puede advertirse que en el caso de tratarse de una distribución de fallos exponencial, la tasa instantánea de fallos es constante:

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

- Lo que confirma el hecho de que la distribución exponencial permite modelizar sistemas cuya tasa de fallos no varía a lo largo del tiempo. Es decir, la cantidad de fallos esperados es independiente de la edad del sistema y, consecuentemente, éstos no guardan relación con causas infantiles ni de envejecimiento.
- Para otras funciones de distribución la tasa de fallos será variable a lo largo del tiempo, como puede observarse en la figura 4.8.

4.7. Tasa de fallos

**a.** Dist. exponencial.**b.** Dist. normal.**c.** Dist. log-normal.**d.** Dist. gamma.**e.** Dist. Rayleigh.**f.** Dist. Weibull.**Figura 4.8.** Tasas de fallos.

4.7. Tasa de fallos

- Cuando no se conoce la función de distribución, es preciso recurrir a un cálculo aproximado de su valor a partir de los valores individuales de las frecuencias de fallo a lo largo de un determinado periodo de tiempo, T , usualmente un año o más.
- Para ello, supuesto que a lo largo del periodo de tiempo T se han contabilizado un total de F fallos en el ítem en estudio, debe hacerse una división del tiempo en intervalos de igual duración, ΔT , y averiguar el número de fallos, f_i , producido en cada uno de esos intervalos.
- La talla de fallos discreta para el intervalo i se calcula por la expresión:

$$\lambda_i(\%) = \frac{f_i}{F} \cdot 100$$

- La tasa de fallos así calculada representa la proporción porcentual de fallos producidos durante el intervalo de tiempo ΔT_i respecto del total de fallos ocurridos a lo largo del periodo de tiempo T .

4.8. CURVA DE BAÑERA

- Como ya se ha visto, la tasa de fallos es función del tiempo, es decir, la proporción de fallos esperados no se mantiene, en general, constante a lo largo del tiempo, sino que cambia de valor al aumentar éste dependiendo de cuál sea la función distribución de fallos.
- En la realidad, el comportamiento de un sistema responde más bien a la acción simultánea de distintos factores relevantes en la aparición del fallo.
- Por tanto, resulta más adecuado estudiar la tasa de fallos del sistema para cada uno de los factores considerados, y obtener finalmente la tasa de fallos global como efecto superpuesto de las tasas de fallos anteriores.
- La obtención de la tasa de fallos de un sistema queda supeditada a la determinación de la tasa de fallo correspondiente a cada uno de los diferentes factores que pueden producir el fallo.

4.8. Curva de bañera

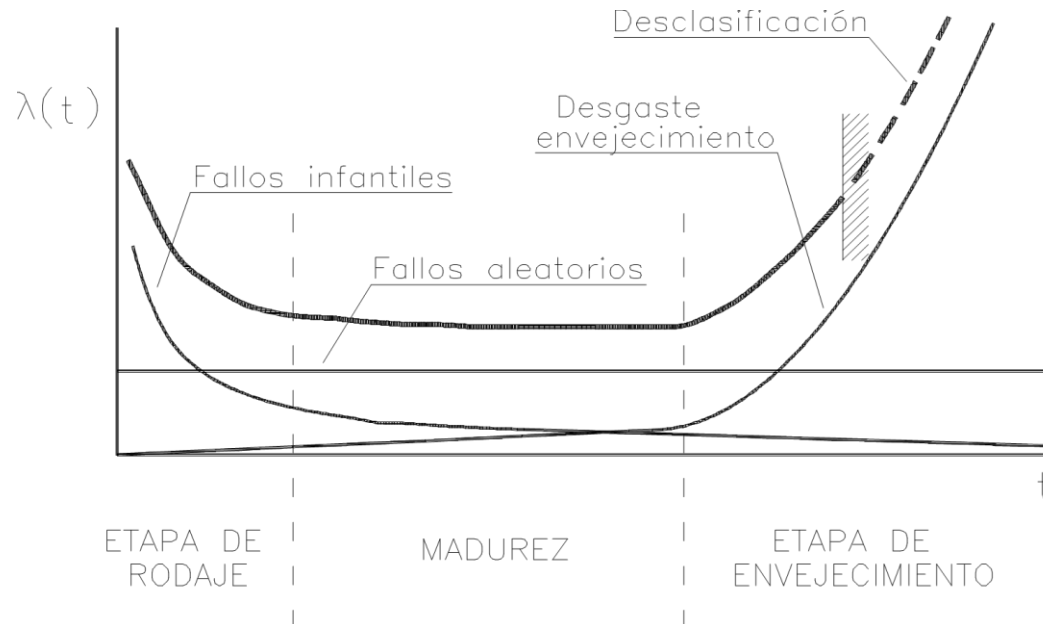
- Algunos factores que frecuentemente intervienen, pero que pueden tener un peso distinto en diferentes campos de estudio, son:
 - Desgaste
 - Defectos de montaje o instalación
 - Accidentes fortuitos
 - Errores de operación
 - Efectos ambientales (temperatura, humedad, agentes químicos, etc.)
 - Defectos de diseño
 - Envejecimiento de los materiales, etc.
- Todos estos factores pueden agruparse en tres grupos fundamentales que están siempre presentes y tienen un efecto determinante en el comportamiento global del sistema. Éstos son:
 - Los defectos infantiles
 - El efecto combinado del desgaste y envejecimiento de los materiales
 - Los fallos por causas aleatorias

4.8. Curva de bañera

- Puede admitirse que la tasa de fallos debida a los **defectos infantiles** es decreciente con el tiempo. Esto supone que el número de fallos del sistema por hora de funcionamiento, como consecuencia de errores de diseño o defectos de montaje, es mayor durante la primera etapa de vida del sistema, y disminuye conforme va transcurriendo el tiempo.
- Por otro lado, la respuesta del sistema ante el **envejecimiento** o el **desgaste** es justamente la contraria de la anterior, es decir, el número de fallos por hora de funcionamiento es pequeño al principio y aumenta al ir aumentando el tiempo.
- Por último, puede decirse que se presentan fallos por **causas aleatorias** siempre que éstos se sucedan de forma independiente entre sí y, además, independientemente del tiempo. Por lo tanto, la tasa de fallos debida a este factor no puede ser dependiente del tiempo, es decir, debe ser constante. Esta condición es satisfecha por la distribución exponencial.

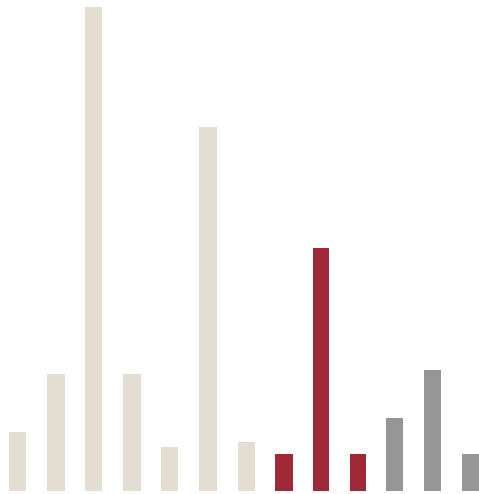
4.8. Curva de bañera

- Si se refleja en un mismo gráfico las tasas de fallo de un sistema correspondientes a cada uno de los factores considerados y se superponen sus efectos, la tasa de fallos resultante indicará la proporción de fallos por unidad de tiempo del sistema.
- La representación gráfica obtenida es comúnmente conocida con el nombre de “curva de bañera”, debido a la forma que adquiere (fig.4.9).

**Figura 4.9.** Curva de bañera (Bathtub curve)

4.8. Curva de bañera

- Como puede observarse en la figura 4.9, en la etapa inicial la tasa de fallos es decreciente, debido al mayor peso del factor correspondiente a los defectos infantiles. Es el denominado “*periodo de rodaje*”.
- Le sigue una zona en la que durante un cierto intervalo de tiempo puede admitirse una tasa de fallos aproximadamente constante, donde predominan los fallos por causas aleatorias. Se trata de la *etapa de funcionamiento normal del sistema*.
- Por último, transcurrido un tiempo suficiente, comienza a hacerse patente el efecto del desgaste o el envejecimiento, mientras que los fallos por causas aleatorias resultan proporcionalmente menores. La probabilidad de fallo durante la *etapa de envejecimiento*, será cada vez mayor.
- En cada caso habrá que decidir a partir de qué valor se deberá procederá a la reparación o al reemplazo del sistema. La cota fijada marca el tiempo de vida del elemento (equipo, sistema, proceso, etc.) antes de la intervención (correctiva, preventiva o sustitutiva).



TEMA 5

FIABILIDAD

Ingeniería del Mantenimiento Industrial



ÍNDICE

- 5.1. Concepto de fiabilidad
- 5.2. Expresión matemática
- 5.3. Fiabilidad de sistemas complejos
- 5.4. Sistemas reparables y no reparables
- 5.5. Estimadores de la fiabilidad
 - 5.5.1. MTBF
 - 5.5.2. Métodos gráficos de análisis

5.1. CONCEPTO DE FIABILIDAD

- Comúnmente, al afirmar que algo es fiable, se pretende expresar cierta seguridad en que cumplirá correctamente la función que tiene asignada.
- Sin embargo, el término fiabilidad, dentro de la ingeniería tiene un significado mucho más concreto, pues hace referencia a la probabilidad de buen funcionamiento del elemento, dispositivo, sistema o proceso en cuestión.
- Se define la **fiabilidad** (o **confiabilidad**) como:

Probabilidad de que un elemento o sistema cumpla una determinada función, en unas condiciones concretas, durante un periodo de tiempo determinado.

- Esta definición resulta ambigua si no se concreta, para cada caso, qué se entiende por “determinada función”. Es preciso, pues, establecer algún criterio para medir o valorar la funcionalidad en cuestión, y concretar los márgenes de funcionalidad admisibles.

5.1. Concepto de fiabilidad

- En ciertos sistemas (o elementos), esta funcionalidad sólo tiene dos estados posibles, todo o nada.
 - Esto sucede, por ejemplo, en el funcionamiento de una lámpara de incandescencia o en la continuidad de un circuito conductor.
- En otros casos, por el contrario, se puede observar una degradación paulatina de la misma, lo que afecta negativamente a los resultados esperados de dicho sistema (o elemento).
 - Tal es el caso, por ejemplo, del nivel de carga de una batería, del estado de un lubricante o del estado superficial de un rodamiento.
- En el primero de los casos la pérdida de funcionalidad queda de manifiesto claramente, mientras que en el segundo caso es preciso establecer un valor, o estado, límite a partir del cual dejan de cumplirse las características funcionales requeridas.
 - Así, por ejemplo, en una lámpara de incandescencia se perdería la funcionalidad al fundirse el filamento; mientras que en un lubricante sería preciso establecer -para cada caso concreto- un determinado nivel de contaminación o degradación para determinar cuándo pierde su funcionalidad.

5.1. Concepto de fiabilidad

- El concepto de fiabilidad en la ingeniería aparece por vez primera antes de la segunda guerra mundial, ligado a la aviación y a otras aplicaciones militares.
- Sin embargo, con anterioridad ya se habían realizado estudios acerca de la esperanza de vida de distintos equipos industriales (Alvord, 1903) y de distintos tipos de cables de telefonía, aunque sin referirse directamente al término fiabilidad.
- La fiabilidad como valor de la probabilidad de buen funcionamiento de un dispositivo o un sistema, comienza a utilizarse durante la segunda guerra mundial.
 - Así, el matemático Erich Pieruschka expuso que la probabilidad de éxito de un sistema venía dada por el producto de las probabilidades individuales de cada uno de sus componentes.
 - Formulación que ya había sido abordada doscientos años antes por el matemático suizo Jakob Bernouilli quien, en su ley del producto de probabilidades, expuso que la probabilidad de ocurrencia de dos sucesos independientes viene dada por el producto de las probabilidades de ocurrencia de cada uno de ellos.

5.1. Concepto de fiabilidad

- En 1953, Boodman, en un estudio realizado sobre la fiabilidad de radares para aviación, encontró que el tiempo de fallo seguía una ley exponencial, lo que también fue confirmado en 1958 por Stoller.
 - En ese mismo año, J. Kao [1958] demostró las ventajas de la utilización de las distribuciones de Weibull para caracterizar la vida media en lámparas de incandescencia.
 - En 1956 Acheson presentó un estudio sobre la utilización de distintos tipos de curvas para representar la tasa de fallos de distintos sistemas.
- Desde entonces, la utilización de las técnicas de fiabilidad se ha venido incrementando en la actividad industrial, principalmente para conocer la fiabilidad de sistemas complejos a partir de la fiabilidad de sus componentes.
 - Sin embargo, la fiabilidad de un elemento sólo puede obtenerse mediante ensayos específicos o a través de la experiencia real.
 - De la bondad de estos ensayos y de los datos recopilados dependerá el acierto del modelo matemático adoptado.

5.2. EXPRESIÓN MATEMÁTICA

- Conocida la función de distribución de fallos, $F(t)$, que representa la probabilidad de que el sistema falle en el intervalo de tiempo comprendido entre el origen y un instante de tiempo t , la fiabilidad, $R(t)$ (de *Reliability*), vendrá dada por el valor complementario a la unidad de la función de distribución de fallo, es decir:

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

- Como era de esperar, la fiabilidad de cualquier elemento en el instante de tiempo inicial ($t=0$) será la unidad, es decir: $R(0) = 1$;
- Si se deja transcurrir el tiempo indefinidamente, es seguro que antes o después se producirá el fallo, es decir: $R(\infty) = 0$.
- No deben confundirse los conceptos de fiabilidad y calidad.
 - Mientras que la calidad indica la conformidad de las especificaciones de un producto respecto a las exigencias requeridas, la fiabilidad indica la capacidad de mantener dichas especificaciones a lo largo del tiempo.
 - Una buena calidad inicial con una baja fiabilidad conducirán en poco tiempo a la pérdida de funcionalidad y, por tanto, de las especificaciones propias de ese nivel de calidad.

5.3. FIABILIDAD DE SISTEMAS COMPLEJOS

- Obtener la fiabilidad de un elemento, o función simple, puede resultar relativamente sencillo siempre y cuando se realicen ensayos con una población de muestra suficientemente amplia.
- Cuando se trata de hacer lo mismo con un sistema complejo, entran en juego otros factores que dificultan el estudio.
 - Coste del sistema
 - Tolerancias de montaje
 - Efecto de factores externos, ambientales, etc.
 - Pequeñas diferencias entre componentes individuales.
- En estos casos es preferible calcular la fiabilidad del sistema a partir de las estimaciones de fiabilidad de los componentes individuales, aplicando las leyes de la probabilidad.
- El cálculo de la fiabilidad en sistemas complejos puede abordarse partiendo de las dos formas básicas que existen para acoplar los componentes: serie y paralelo.

5.3. Fiabilidad de sistemas complejos

Sistemas en serie

- Un agrupamiento en serie de n componentes forma un sistema (o subsistema) en el que el fallo de uno sólo de ellos comporta el fallo del sistema.
- Por lo tanto, la probabilidad de que el sistema no falle antes de un instante de tiempo dado, es decir, su fiabilidad, vendrá dada por el producto de las fiabilidades de cada uno de los componentes:

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

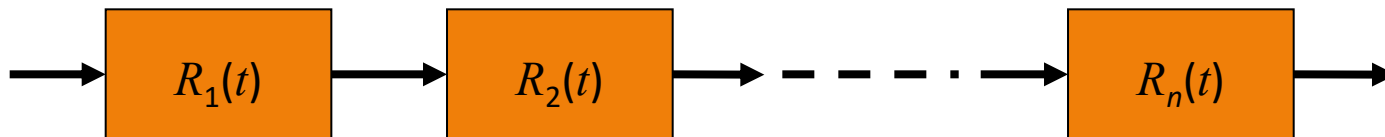


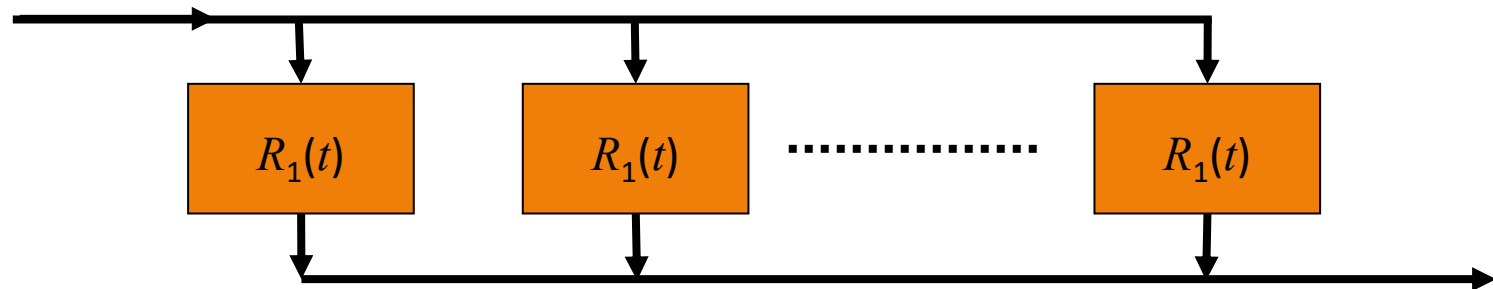
Figura 5.1. Sistema en serie.

5.3. Fiabilidad de sistemas complejos

Sistemas en paralelo

- Un agrupamiento en paralelo de n componentes forma un sistema (o subsistema) en el que es preciso que fallen todos los componentes para que se produzca el fallo del sistema.
- Por lo tanto, la probabilidad de que el sistema falle vendrá dada por el producto de las probabilidades de fallo de cada uno de los componentes y, en consecuencia, su fiabilidad será:

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

**Figura 5.2.** Sistema en paralelo.

5.3. Fiabilidad de sistemas complejos

Sistemas redundantes

- Un caso especialmente interesante y frecuente dentro de los sistemas con componentes en paralelo, es aquel en el que éstos no funcionan simultáneamente sino que algunos de ellos se tienen de reserva, en previsión del fallo de otro.
- Un componente de reserva entrará en funcionamiento cuando alguno de los que estaba funcionando hasta entonces haya fallado.
- Simplificando el problema a dos componentes, la fiabilidad del sistema será igual a la fiabilidad del componente que está funcionando, más el producto de la probabilidad de que este componente falle en el instante t_1 por la probabilidad de que no falle el de reserva (fiabilidad del componente de reserva) durante el intervalo $t - t_1$, es decir:

$$R(t) = R_1(t) + [1 - R_1(t_1)]R_2(t - t_1)$$

5.4. SISTEMAS REPARABLES Y NO REPARABLES

- Un sistema reparable es aquel que cuando falla puede repararse, ya sea sustituyendo alguno de sus componentes elementales o corrigiendo desviaciones en alguna variable del mismo.
 - Ejemplos: Sustitución de rodamientos en un motor (el sistema en estudio es el motor), equilibrado de un rotor, alineación de ejes acoplados, etc.
- Un sistema no reparable es aquel en el que una vez producido el fallo es preciso reemplazar el sistema o elemento en cuestión.
 - Ejemplos: Rotura de un rodamiento (el sistema en estudio es el rodamiento), contaminación de un lubricante, rotura de un microprocesador, etc.
- En ambos casos, la estimación de la fiabilidad de los sistemas se hace mediante observaciones de los periodos de tiempo transcurridos hasta que se produce el fallo del sistema, lo que se conoce como tiempo entre fallos (o tiempo de buen funcionamiento), *TBF (Time Between Failures)*, en los sistemas reparables y tiempo hasta el fallo, *TTF (Time To Failure)*, en los sistemas no reparables.

5.4. Sistemas reparables y no reparables

- Debe observarse que las condiciones en las que se obtienen los dos tipos de muestras no las mismas:
 - En el análisis de sistemas no reparables se dispone de las observaciones del tiempo de fallo correspondientes a varios componentes del mismo tipo, y la hipótesis de independencia e idéntica distribución (i.i.d.), suele ser habitual.
 - En los sistemas reparables, sin embargo, se utilizan normalmente medidas sucesivas realizadas sobre el mismo sistema, y la hipótesis de i.i.d. acerca de la duración de los intervalos de funcionamiento puede no ser admisible, ya que no siempre puede garantizarse que las condiciones tras la reparación serán idénticas a las que tenía el sistema en el origen de tiempos.

5.5. ESTIMADORES DE LA FIABILIDAD

5.5.1. MTBF

- Dado que la fiabilidad viene dada por una probabilidad y no siempre es posible disponer de su modelo matemático, se buscan estimadores que permitan predecir la esperanza de vida del sistema en estudio.
- Estrictamente, si se representa por $f(t)$ la densidad de probabilidad de fallo de un dispositivo, la esperanza de vida del mismo, $E(t)$, es decir, el periodo de tiempo esperado antes de que se produzca el fallo, vendrá dado por:

$$E(t) = \int_0^{\infty} t f(t) dt$$

- Este valor, de gran interés, se denomina *tiempo medio entre fallos*, en sistemas reparables, y se denota como **MTBF** (*Mean Time Between Failure*); mientras que en sistemas no reparables se denomina *tiempo medio hasta el fallo*, denotado como **MTTF** (*Mean Time To Failure*).

5.5. Estimadores de la fiabilidad

- Para estimar este valor, a partir de los datos discretos experimentales, se recurre al historial disponible.
 - En sistemas reparables, se contabilizan los sucesivos intervalos TBF , es decir, de tiempo de buen funcionamiento, y se calcula su valor medio.

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

- En sistemas no reparables, se contabilizan los TTF , es decir, tiempos hasta el fallo de los diferentes elementos ensayados, y se calcula su valor medio.

$$MTTF = \frac{\sum_{i=1}^n TTF_i}{n}$$

- El cálculo de estos valores debe realizarse teniendo en cuenta únicamente los tiempos de funcionamiento, es decir, descontando los tiempos de parada. De no proceder así se obtendrían fiabilidades cada vez más altas cuanto más tiempo permaneciera parado el dispositivo o equipo en estudio, lo que obviamente es absurdo.

5.5. Estimadores de la fiabilidad

- En sistemas no reparables es frecuente asumir una distribución de tipo normal e indicar el *MTTF* como **vida media** del elemento o, a veces, como **número medio de operaciones**.
 - Ejemplos: En las lámparas de incandescencia es frecuente dar el número medio de horas de funcionamiento, mientras que en tubos fluorescentes acostumbra a darse el número de encendidos.
- En otros elementos es norma dar un valor de **vida nominal**, definida como el tiempo de vida esperado con una probabilidad determinada.
 - Ejemplo: Para cada tipo de rodamiento se define la vida nominal (L_n) como el valor de duración obtenido en el ensayo de un lote suficientemente grande en el que al menos el 90% de los rodamientos ensayados alcanzó o sobrepasó dicho valor sin presentar síntomas de fatiga.
- La **tasa de fallos** también puede utilizarse como estimador de la fiabilidad del elemento, especialmente si se dispone de su evolución pasada y tendencia, pues permite, ya sea por métodos analíticos o gráficos, realizar previsiones de su **vida remanente***.

* En la literatura técnica suele emplearse el término **Remaining Useful Life (RUL)**.

5.5. Estimadores de la fiabilidad

5.5.2. MÉTODOS GRÁFICOS DE ANÁLISIS

- Existen diversos métodos gráficos para estimar de una forma rápida y, sobre todo, intuitiva el instante de tiempo en el que debe procederse a la reparación o, según el caso, a la sustitución de un elemento. Se trata pues de analizar el último periodo de la curva de bañera
- Como ya se dijo, en esta etapa adquieren relevancia casi exclusiva los fallos por envejecimiento o por desgaste de los materiales.
- En estos casos, el modelo matemático que mejor refleja esta circunstancia es, por su gran versatilidad, la distribución de Weibull.
- Puesto que se trata de funciones de tipo exponencial, una sencilla transformación matemática aplicando logaritmos consigue convertir en rectas lo que en realidad son curvas (figura 5.3).
- Los métodos gráficos se basan en convertir la parte final de la curva de bañera en una recta, con el fin de estudiar no ya sólo su valor, sino los posibles cambios producidos en su pendiente.

5.5. Estimadores de la fiabilidad

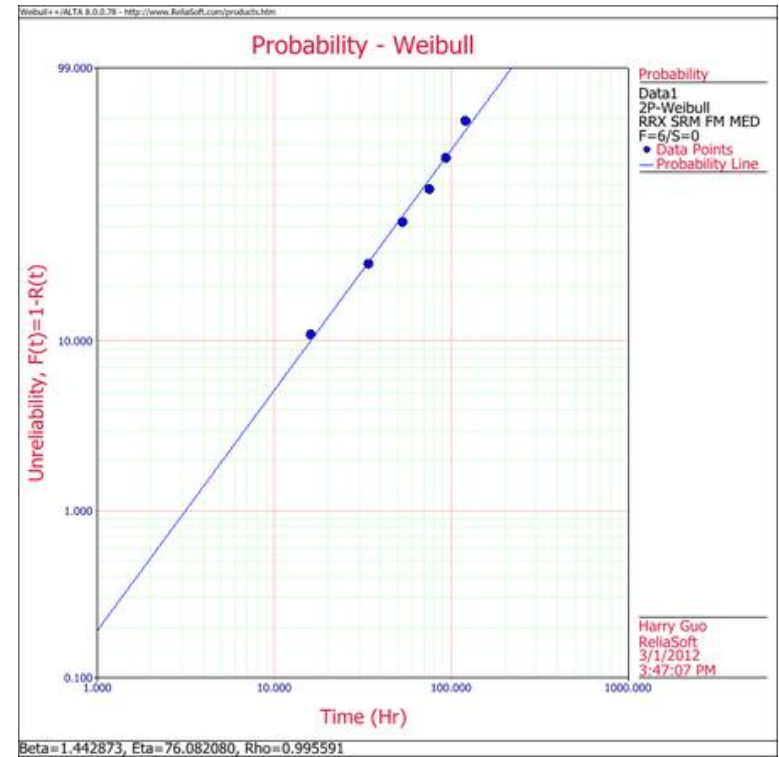
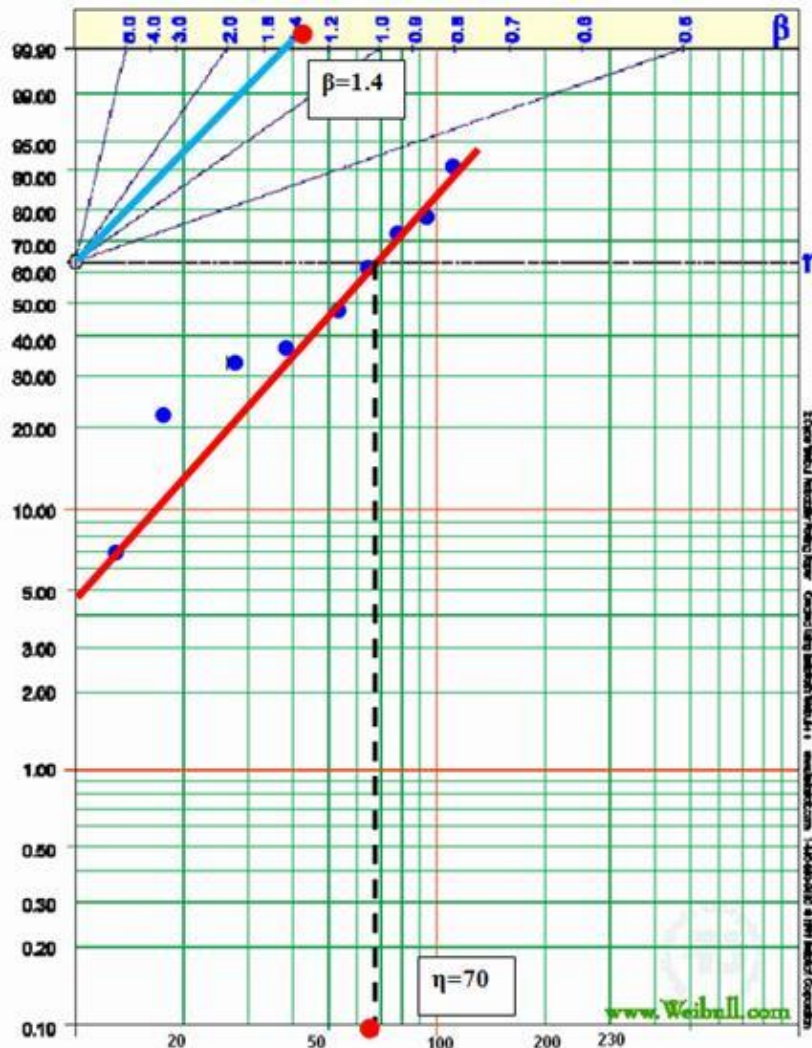
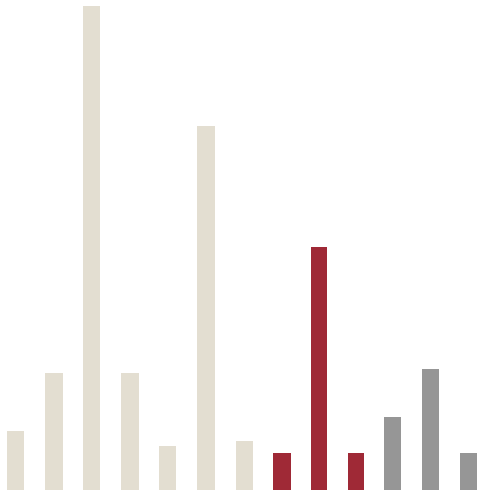


Figura 5.3. Gráficos de Weibull.

TEMA 6

MANTENIBILIDAD Y DISPONIBILIDAD



Ingeniería del Mantenimiento Industrial



ÍNDICE

- 6.1. Generalidades
- 6.2. Mantenibilidad
- 6.3. MTTR
- 6.4. Disponibilidad

6.1. GENERALIDADES

- Conseguir una fiabilidad elevada es, en todos los casos, un objetivo evidente. Sin embargo, la realidad demuestra que los fallos se siguen produciendo.
 - Desde un punto de vista estadístico, porque la probabilidad de fallo podrá reducirse hasta valores muy pequeños, pero nunca puede hacerse nula.
 - Por otra parte, porque en sistemas, procesos o elementos en los que predominan los factores económicos, la inversión en fiabilidad no puede aumentarse indefinidamente.
- Puesto que el fallo debe preverse desde el mismo momento de la puesta en marcha del sistema considerado, también deben planificarse las adecuadas estrategias de mantenimiento para retardar su aparición (mejorar su *fiabilidad extrínseca*) y para minimizar el impacto del fallo.
- Además de la *fiabilidad*, existe una gran variedad de indicadores del estado funcional y de mantenimiento de un sistema. De todos ellos, los más importantes son la *mantenibilidad* y la *disponibilidad*.

6.2. MANTENIBILIDAD

Puede definirse la mantenibilidad como:

Probabilidad de que un elemento, equipo o sistema sea restaurado completamente a su estado operativo dentro de un periodo de tiempo dado, de acuerdo con unos criterios de funcionamiento y procedimientos de reparación preestablecidos.

- Por tanto, la mantenibilidad es una función de distribución de probabilidad, y se denota por $M(t)$, que viene dada por la expresión:

$$M(t) = \int_0^t m(t) dt$$

donde $m(t)$ es la función de densidad de probabilidad de tiempos de reparación.

- Al igual que se dijo en el caso de la fiabilidad, la función $m(t)$, que permite modelizar la mantenibilidad, debe estimarse a partir de los datos experimentales.

6.2. Mantenibilidad

- Puesto que el valor de la mantenibilidad para un tiempo dado supone, de alguna manera, la valoración de la facilidad de reparación, es evidente que no es un concepto inherente a la funcionalidad del propio dispositivo o equipo en cuestión, sino que viene afectado por otros factores ajenos a la misma, tales como:
 - Características del diseño
 - Ubicación
 - Capacidades de la empresa
 - Estrategias logísticas
 - Cualificación del personal de mantenimiento
 - Condiciones ambientales, etc.
- Se entiende, por tanto, que el valor de la mantenibilidad se encuentra íntimamente ligado a las características y política de mantenimiento de la empresa y no sólo a aspectos funcionales y de diseño concretos del elemento, equipo, sistema o proceso en cuestión.

6.3. MTTR

- Si bien la mantenibilidad viene dada por una probabilidad, puesto no siempre es posible disponer de su modelo matemático, se buscan estimadores que permitan orientar acerca del tiempo de reparación del sistema en estudio.
- Estrictamente, si se representa por $m(t)$ la densidad de probabilidad de tiempos de reparación de un dispositivo, el valor medio del mismo del mismo, es decir, el tiempo que por término medio se espera emplear en la reparación, vendrá dado por:

$$MTTR = \int_0^{\infty} t \, m(t) \, dt$$

- Si ya era complicado tener los datos suficientes para encontrar la función de distribución de fallos, más aún lo es disponer de un modelo de la mantenibilidad y, en consecuencia de la función de densidad de tiempos de reparación. En muchos casos apenas se dispone de un conjunto reducido de datos al respecto.

6.3. MTTR

- Para estimar este valor, a partir de los datos discretos experimentales, se recurre al historial disponible.
- Se contabilizan los sucesivos intervalos TTR , es decir, de tiempo de reparación, y se calcula su valor medio.

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

- En el cómputo del TTR no deben contabilizarse los tiempos “muertos”, entendiendo por tales todos aquellos no invertidos directamente en la reparación, como son: paros de trabajo, tareas burocráticas, y tiempos de espera por ausencia de personal, por falta de los útiles o herramientas o por carecer de los recambios necesarios.
- Debe puntualizarse que el concepto de TTR no sólo se utiliza para reparaciones sino para cualesquiera intervenciones de mantenimiento, tales como tareas preventivas o predictivas.

6.3. MTTR

- Además del TTR , también deben conocerse los tiempos no invertidos en la reparación pero que mantienen al ítem fuera de servicio.
- El tiempo total durante el cual el ítem en estudio está averiado o fuera de servicio se suele denotar como TA^* (Tiempo de Avería), y se obtiene como suma del TTR y de todos los tiempos muertos.
- Al valor medio de estos tiempos se le denomina Media de los Tiempos de Avería, lo que se indica por MTA .

$$MTA = \frac{\sum_{i=1}^n TA_i}{n}$$

- Si se constata que la diferencia entre el MTA y el $MTTR$ es grande, debería pensarse en la existencia de un fallo del soporte logístico, es decir, la gestión de las intervenciones y reparaciones penaliza seriamente los tiempos realmente necesarios para la reparación.

* BT (Breakdown Time)

6.4. DISPONIBILIDAD

- En general, con el término disponibilidad se pretende significar la capacidad de algo para ser utilizado cuando se necesita. Esto es, en definitiva, el motivo central del mantenimiento.
- Se define la **disponibilidad**, y se denota por $D(t)$ (a veces como $A(t)$, del inglés *Availability*), como:

Probabilidad de estar en condiciones de funcionar un dispositivo, equipo o sistema durante un determinado tiempo.

- Conocer la disponibilidad de los distintos elementos que componen una instalación, es disponer de un instrumento para medir la efectividad de los planes de mantenimiento realizados.
- De poco sirve efectuar un buen mantenimiento si los equipos se averían constantemente, es decir, si la fiabilidad de los mismos es baja. Por lo que ambos factores, fiabilidad y mantenibilidad, son determinantes en la valoración de la disponibilidad.

6.4. Disponibilidad

- En cuanto a la fiabilidad, es sabido que cuanto mayor sea ésta, más tarde se producirá -por termino medio- el fallo. Por lo que durante más tiempo estará disponible el elemento en cuestión.
- El otro factor, la mantenibilidad, resulta determinante por las siguientes razones:
 - Una vez producido el fallo, cuanto menores sean los tiempos invertidos en la reparación de los equipos, tanto mayor será la disponibilidad de éstos.
 - Mediante una correcta política de mantenimiento, a través de inspecciones periódicas, entretenimiento y la corrección de posibles desviaciones es posible retrasar la aparición del fallo.
 - Con un adecuado mantenimiento predictivo puede disminuirse considerablemente los tiempos de parada y reparación. Además, puede conseguirse que el alcance de los fallos sea menor.

6.4. Disponibilidad

- Para obtener la expresión de la disponibilidad partiremos del planteamiento siguiente:
 1. La disponibilidad de un ítem en un instante de tiempo $(t + dt)$, es decir, la probabilidad de que se encuentre disponible en dicho instante, vendrá dada por la suma de las probabilidades de los dos sucesos siguientes:
 2. Que esté disponible en el instante de tiempo t y no falle durante el intervalo dt subsiguiente.
 3. Que no esté disponible en el instante de tiempo t y se repare en el intervalo dt subsiguiente.

Esto se expresará como sigue:

$$D(t + dt) = D(t) [1 - \lambda(t) dt] + [1 - D(t)] \mu(t) dt$$

donde $\mu(t)$ es la tasa de reparaciones, esto es, la proporción de reparaciones por unidad de tiempo.

Reorganizando términos en la expresión anterior y operando resulta:

$$\frac{dD(t)}{dt} + D(t) [\lambda(t) + \mu(t)] = \mu(t)$$

6.4. Disponibilidad

- Si tanto la función de distribución de fallos, $F(t)$, como la función de distribución de tiempos de reparación, $M(t)$, siguen una ley exponencial, la solución de la ecuación diferencial anterior será:

$$D(t) = \frac{1}{\lambda + \mu} [\mu + \lambda e^{-(\lambda + \mu)t}]$$

que también recibe el nombre de *disponibilidad instantánea*.

- Se observa en la expresión anterior que al aumentar indefinidamente el tiempo, la disponibilidad instantánea tiende asintóticamente al valor constante siguiente:

$$D = \frac{\mu}{\lambda + \mu}$$

que recibe el nombre de *disponibilidad estacionaria*, coeficiente de disponibilidad o, cuando no haya duda, simplemente disponibilidad.

6.4. Disponibilidad

Teniendo en cuenta que la tasa de fallos y la tasa de reparaciones vienen dadas respectivamente por las expresiones generales:

TASA DE FALLOS.-

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)}$$

donde:

- $f(t)$ es la densidad de probabilidad de fallos.
- $R(t)$ es la Fiabilidad.

TASA DE REPARACIONES.-

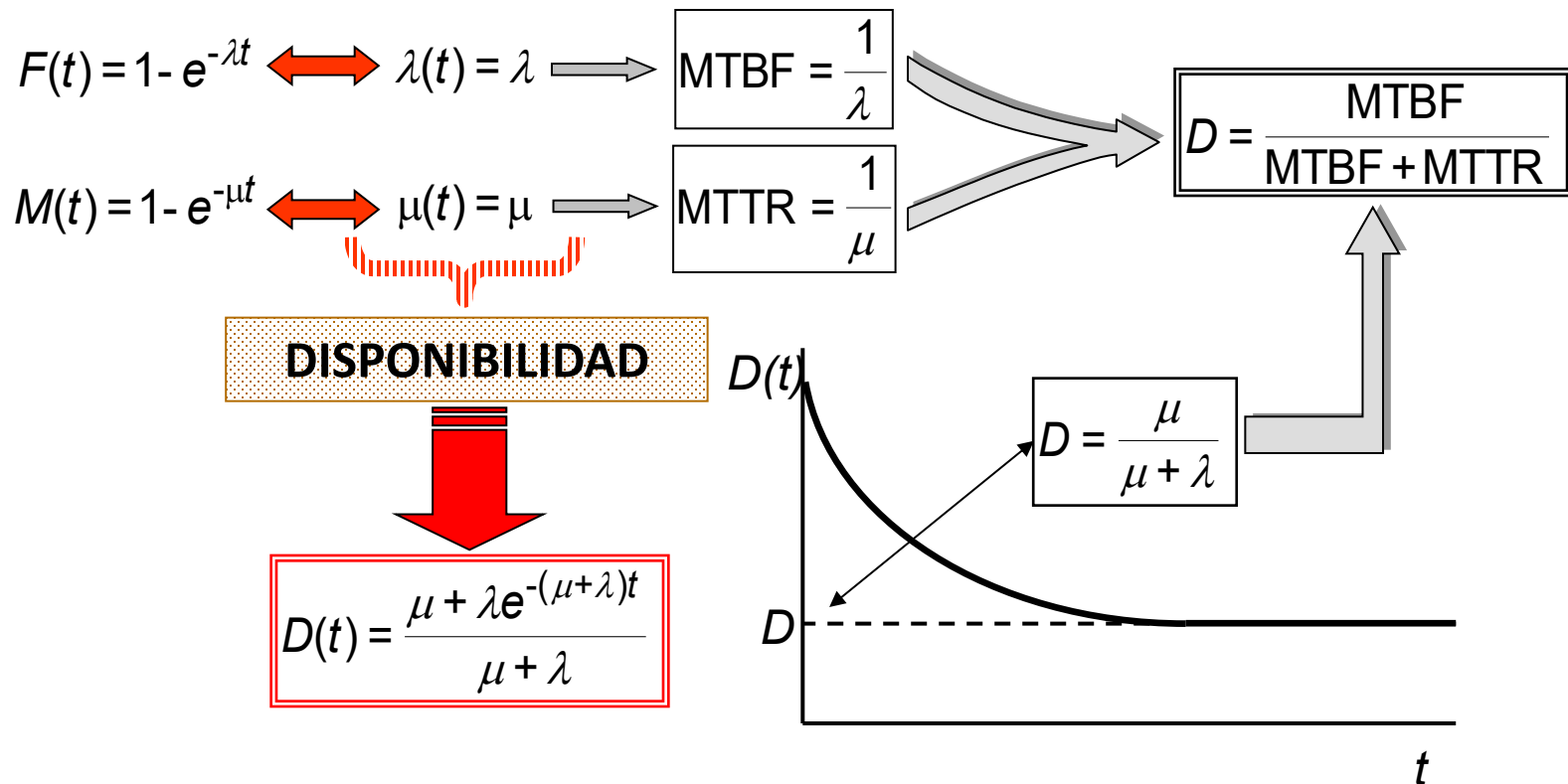
$$\mu(t) = \frac{m(t)}{1 - M(t)}$$

donde:

- $m(t)$ es la densidad de probabilidad de tiempos de reparación.
- $M(t)$ es la Mantenibilidad.

6.4. Disponibilidad

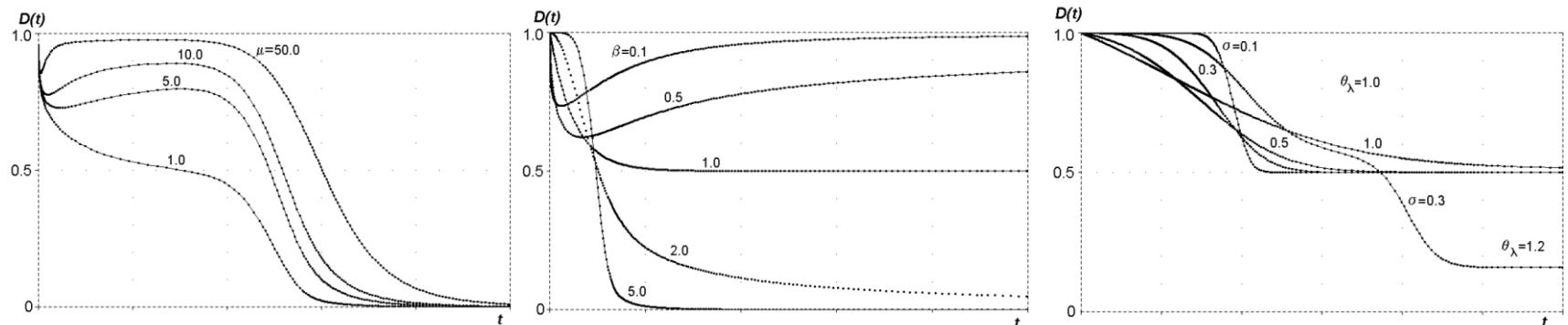
Cuando se mantiene constante la proporción de fallos y de reparaciones, es decir, se trata de funciones de distribución de tipo *exponencial*.



6.4. Disponibilidad

Cuando las funciones de distribución no siguen una ley exponencial, no es posible encontrar una expresión explícita de la disponibilidad, pudiéndose dar situaciones en las que los fallos disminuyen con el tiempo, sin una tendencia asintótica clara, aumentan con el transcurrir del tiempo o la tendencia en los fallos es cambiante.

En tales casos, se obtienen ecuaciones diferenciales complejas en las que es preciso recurrir a métodos numéricos para conocer el valor de la disponibilidad con el tiempo, como en los ejemplos siguientes:



6.4. Disponibilidad

F(t) de Rayleigh, M(t) Exp.

$$\frac{dD(t)}{dt} + D(t) \left[\frac{t}{m^2} + \mu(t) \right] = \mu(t)$$

F(t) de Weibull, M(t) Exp.

$$\frac{dD(t)}{dt} + D(t) \left[\frac{\beta}{\eta^\beta} (t - t_0)^{\beta-1} + \mu(t) \right] = \mu(t)$$

F(t) Normal, M(t) Exp.

$$\frac{dD(t)}{dt} + D(t) \left[\frac{e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{t-\theta}{\sigma} \right)^2}}{\sigma \sqrt{2\pi} - \int_0^t e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{t-\theta}{\sigma} \right)^2} dt} + \mu(t) \right] = \mu(t)$$

F(t) Normal, M(t) Log-Normal

$$\frac{dD(t)}{dt} + D(t) \left[\frac{e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{t-\theta}{\sigma} \right)^2}}{\sigma \sqrt{2\pi} - \int_0^t e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{t-\theta}{\sigma} \right)^2} dt} + \frac{\frac{1}{t} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln t - \theta'}{\sigma'} \right)^2}}{\sigma' \sqrt{2\pi} - \int_0^t \frac{1}{t} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln t - \theta'}{\sigma'} \right)^2} dt} \right] = \frac{\frac{1}{t} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln t - \theta'}{\sigma'} \right)^2}}{\sigma' \sqrt{2\pi} - \int_0^t \frac{1}{t} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln t - \theta'}{\sigma'} \right)^2} dt}$$

6.4. Disponibilidad

- Por tal razón, en la mayoría de los casos, es suficiente con la aproximación aportada al considerar que las funciones de distribución de fallos y la mantenibilidad son exponenciales. En tal caso, la tasa de fallos, $\lambda(t)$, y la tasa de reparaciones, $\mu(t)$, son constantes e iguales a las inversas del $MTBF$ y $MTTR$, respectivamente, la disponibilidad estacionaria puede escribirse como:

$$D = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$$

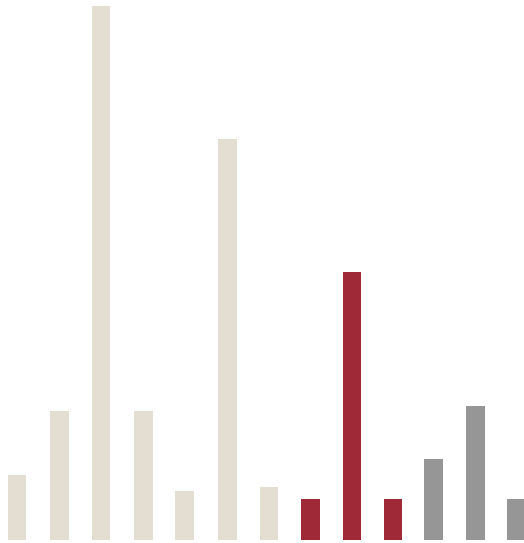
- Dado el interés que tiene conocer los tiempos reales de inactividad del ítem en estudio, se utiliza muy frecuentemente como medida de la disponibilidad la expresión siguiente:

$$D = \frac{MTBF}{MTBF + MTA}$$

donde el denominador representa el tiempo total destinado al servicio mientras que el numerador es el tiempo que realmente ha estado disponible el ítem.

TEMA 7

INTRODUCCIÓN A LAS TÉCNICAS DE INSPECCIÓN DE EQUIPOS



Ingeniería del Mantenimiento Industrial



UNIVERSIDAD DE
MURCIA

ÍNDICE

- 7.1. Introducción
- 7.2. Clasificación de las técnicas de inspección
- 7.3. Parámetros de significación funcional
- 7.4. Método general de diagnosis

7.1. INTRODUCCIÓN

- La finalidad primordial de cualquier tipo de mantenimiento es mejorar la disponibilidad de los equipos e instalaciones.
- Las dos líneas básicas de actuación para conseguir esto son:
 - Procurar minimizar los fallos
 - Reducir los tiempos de reparación
- Por tanto, una buena política de mantenimiento debe ir encaminada a actuar en estas dos direcciones mediante:
 - **Técnicas predictivas**
 - **Inspecciones preventivas**
 - **Adecuada gestión del fallo**
- Se llaman **técnicas de inspección** (o también de verificación) las *técnicas que se aplican al examen y seguimiento del estado de un equipo, o de ciertos parámetros característicos del mismo, con el fin de detectar anomalías, defectos, fallos o cambios en sus condiciones funcionales.*

7.2. CLASIFICACIÓN DE LAS TÉCNICAS DE INSPECCIÓN

- La inspección regular de los equipos es la clave del mantenimiento preventivo. Mediante *rutinas de revisión y reemplazo* periódico de elementos sujetos a desgaste se busca adelantarse al fallo; en realidad, disminuir en lo posible su probabilidad de fallo.
- Cuando la inspección del equipo se hace con fines predictivos, se procede a la medida y evaluación de ciertos parámetros funcionales que permitan conocer su estado sin necesidad de desmontar total o parcialmente el equipo sino mientras este se encuentra en funcionamiento.
- La medida de estos parámetros funcionales puede hacerse de forma continua, monitorizando permanentemente el equipo, o de forma intermitente, a intervalos regulares. En tal caso, a la rutina periódica de inspecciones cuya finalidad es la medición de uno o más parámetros, se le suele denominar *ruta de medida*.

7.2. Clasificación de las técnicas de inspección

- Existe un gran número de técnicas de inspección, pero pueden dividirse en dos grandes grupos:
 - Técnicas directas
 - Técnicas indirectas

Técnicas directas

- Son aquellas técnicas en las que se inspeccionan directamente los elementos de la máquina para observar su estado. Es decir, es el elemento cuyo estado se quiere conocer el que se inspecciona directamente, lo que obliga a tener acceso al mismo, por lo que en la mayoría de los casos es preciso, no solo parar la máquina, sino en muchos casos proceder a su desmontaje.

7.2. Clasificación de las técnicas de inspección

- La técnica de verificación directa más utilizada es, sin lugar a dudas, la *Inspección Visual*, ya sea directamente o mediante instrumentos de inspección.
- Otras técnicas directas de frecuente utilización son:
 - Líquidos penetrantes
 - Partículas magnéticas
 - Ultrasonidos
 - Análisis físico-químico de los materiales
 - Análisis de lubricantes
 - Inspección radiográfica, etc.

7.2. Clasificación de las técnicas de inspección

Técnicas indirectas

- Son aquellas técnicas en las que la evaluación del estado de la máquina, o de un elemento de la misma, se hace a través de la medida y análisis de algún *parámetro de significación funcional*.
- Estas técnicas de inspección son las que resultan especialmente aptas para ser utilizadas en un programa de mantenimiento predictivo.
- Aunque cada vez existen nuevos desarrollos tecnológicos al alcance de los responsables de mantenimiento en la industria, la técnica más importante y representativa de este grupo es el *análisis de vibraciones*, que constituye el origen y la "piedra angular" del mantenimiento predictivo.
- Otras técnicas indirectas importantes son:
 - Análisis de ultrasonidos
 - Medida de la temperatura
 - Análisis de partículas en el lubricante
 - Medida de los impulsos de choque
 - Análisis del espectro de corriente, etc.

7.3. PARÁMETROS DE SIGNIFICACIÓN FUNCIONAL

- Las técnicas de inspección indirecta se apoyan en la existencia de ciertos parámetros indicadores del estado del equipo, cuya medida y análisis permita detectar y diagnosticar el estado del equipo.
- A estos parámetros se le denomina *parámetros de significación funcional*, y a las técnicas de inspección utilizadas para su medida y análisis se las conoce también como *Técnicas de Verificación Mecánica*.
- Por tanto, se denominan **parámetros de significación funcional (PSF)**, o parámetros funcionales relevantes, a aquellas *magnitudes físicas susceptibles de experimentar algún tipo de modificación, de signo repetitivo, en su valor cuando varía el estado físico o funcional de la máquina*.
- Las dos características expuestas: *modificabilidad* y *repetitividad*, son fundamentales para que una magnitud física pueda ser considerada parámetro relevante.

7.3. Parámetros de significación funcional

- Otra característica fundamental para seleccionar y medir un parámetro es su *sensibilidad* ante los cambios de estado del equipo.
- Existen infinidad de magnitudes físicas que mantienen alguna relación con el funcionamiento de una máquina, sin embargo, no todas ellas se muestran igualmente sensibles ante los cambios de estado de la misma.
- Además, la elección de los mejores parámetros de significación funcional en cada caso dependerá de diferentes factores, como los siguientes:
 - Tipo de máquina,
 - Características del proceso
 - Equipo en el que se encuentre integrada
 - Coste de la Instrumentación necesaria
 - Recursos humanos y cualificación
 - Facilidad para su medida e interpretación
 - Accesibilidad
 - Posibilidad de instalación permanente de los captadores
 - Cambios requeridos en la estructura organizativa, etc.

7.3. Parámetros de significación funcional

Los parámetros de significación funcional pueden clasificarse atendiendo a distintos criterios:

- I. Atendiendo a las características de la medida del parámetro:
 - Parámetros cuya medida es cuantificable (temperatura, vibración, presión, etc.)
 - Parámetros cuya medida se da en forma cualitativa (estado de deterioro u oxidación de superficies, presencia de fugas o pérdidas de lubricante, cambios de color, etc.).
- II. Atendiendo a su relación con el proceso:
 - Parámetros principales de proceso (velocidad de régimen, potencia, intensidad de corriente de carga, presión, temperatura del fluido, caudal, etc.)
 - Parámetros derivados del proceso (ruido, vibración, temperatura, etc.)

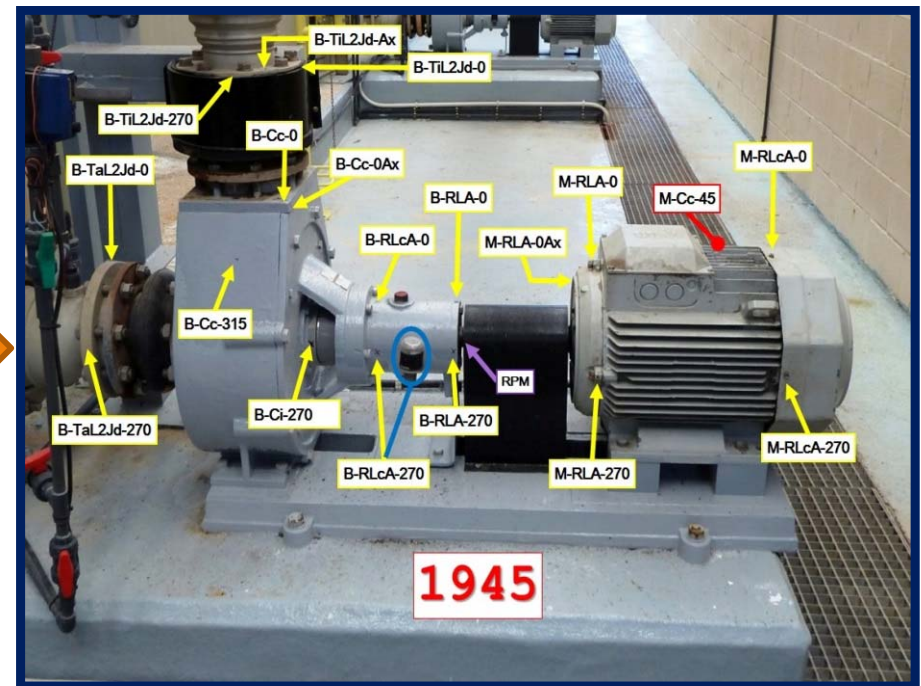
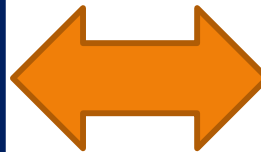
7.3. Parámetros de significación funcional

- III. Atendiendo a la modelización paramétrica de la máquina:
 - Parámetros con referencia propia.
 - Parámetros con referencia ajena.
- IV. Atendiendo al tiempo de evaluación:
 - Parámetros de respuesta inmediata.
 - Parámetros de evaluación diferida.
- V. Atendiendo a criterios estadísticos:
 - Parámetros relacionados con la fiabilidad.
 - Parámetros de evolución o tendencia.
 - Parámetros relativos a las características nominales del equipo.
- VI. Atendiendo al rendimiento obtenido:
 - Parámetros relacionados con la calidad del producto.
 - Parámetros referidos a la uniformidad funcional.
 - Parámetros relacionados con los consumos (energético, agua, etc.)
 - Parámetros económicos.

7.4. MÉTODO GENERAL DE DIAGNOSIS

El procedimiento general para detectar y diagnosticar un defecto en un equipo mediante un *PSF* consta de los siguientes pasos:

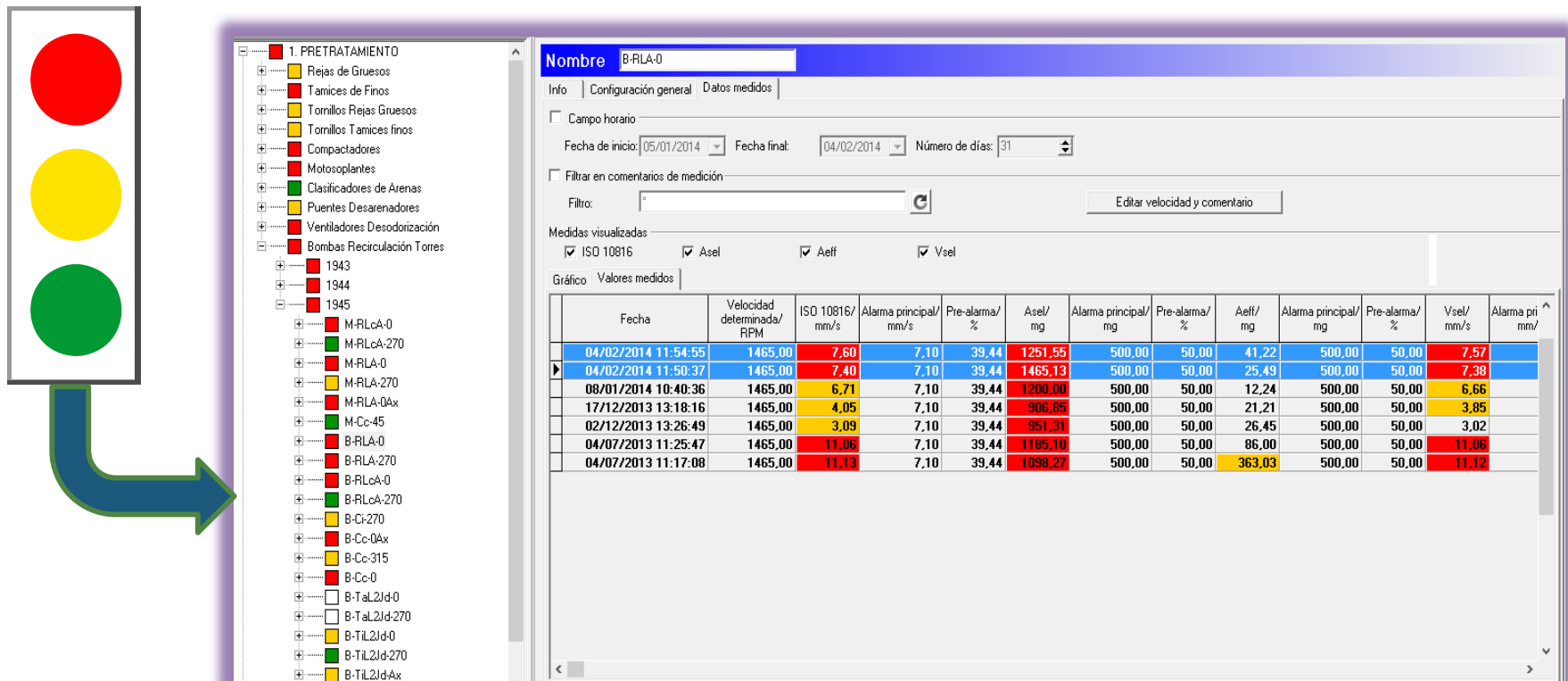
1. Medida de parámetros de significación funcional (*PSF*) de los equipos.



7.4. Método general de diagnosis

2. Detección de los cambios en los parámetros medidos.

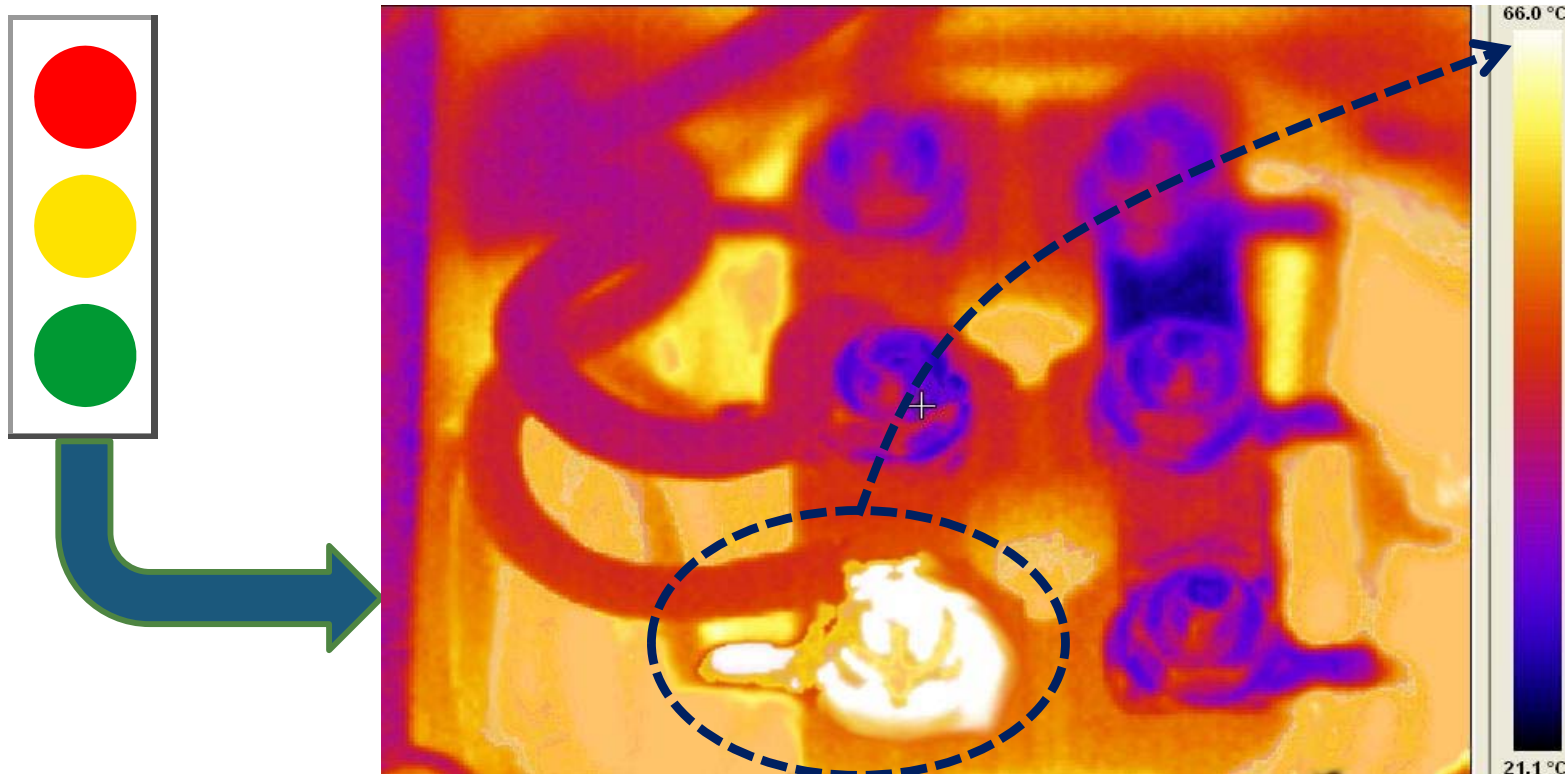
- La aparición de un defecto en la máquina, incluso en fase incipiente, lleva asociados ciertos cambios en algunos *PSF* (vibración, temperatura,...).
- Búsqueda de alguna variación en alguno de los parámetros por encima de los niveles de Alerta y/o Alarma.



7.4. Método general de diagnosis

2. Detección de los cambios en los parámetros medidos.

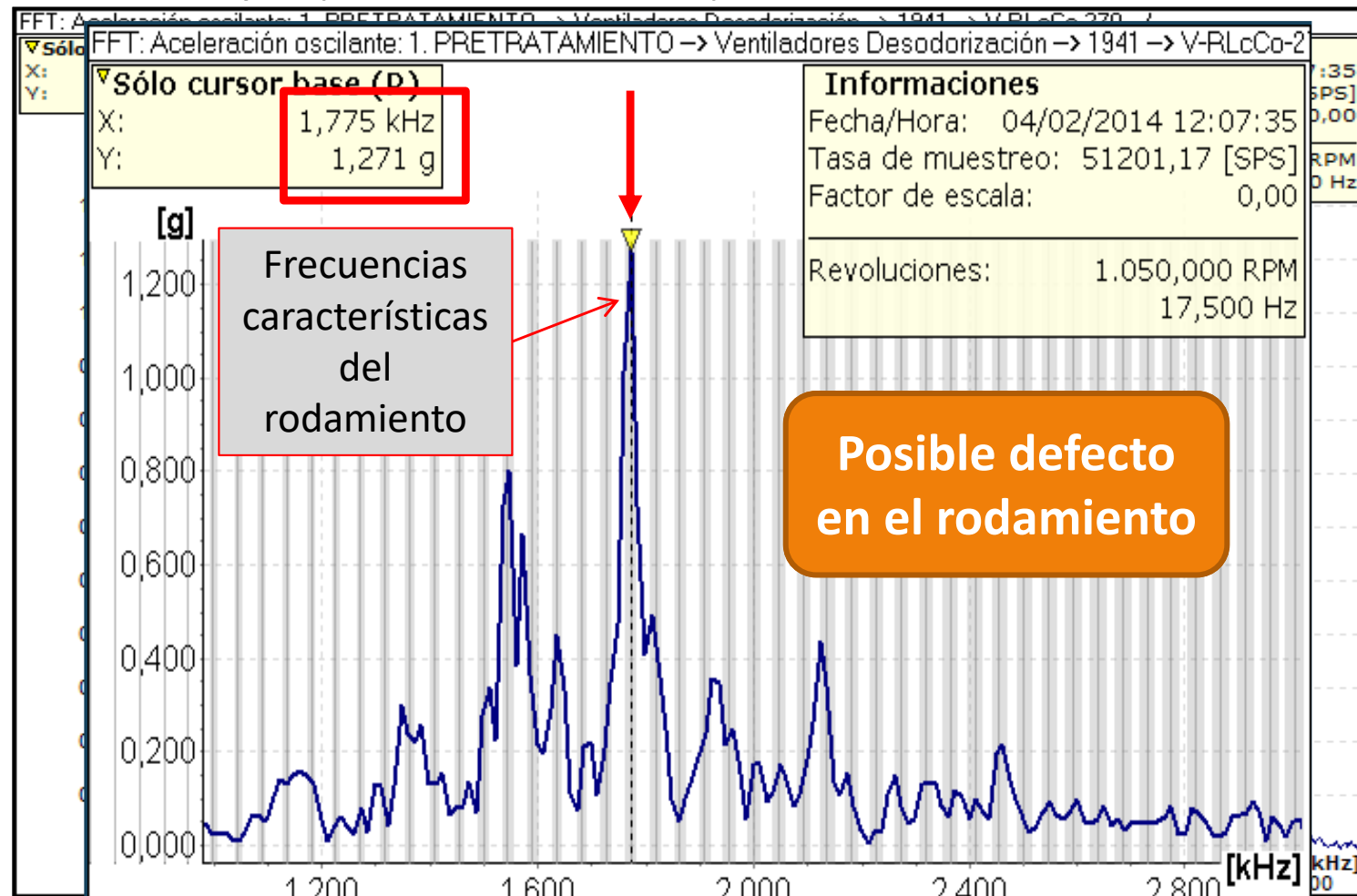
- a) La aparición de un defecto en la máquina, incluso en fase incipiente, lleva asociados ciertos cambios en algunos *PSF* (vibración, temperatura,...).
- b) Búsqueda de alguna variación en alguno de los parámetros por encima de los niveles de Alerta y/o Alarma.



7.4. Método general de diagnosis

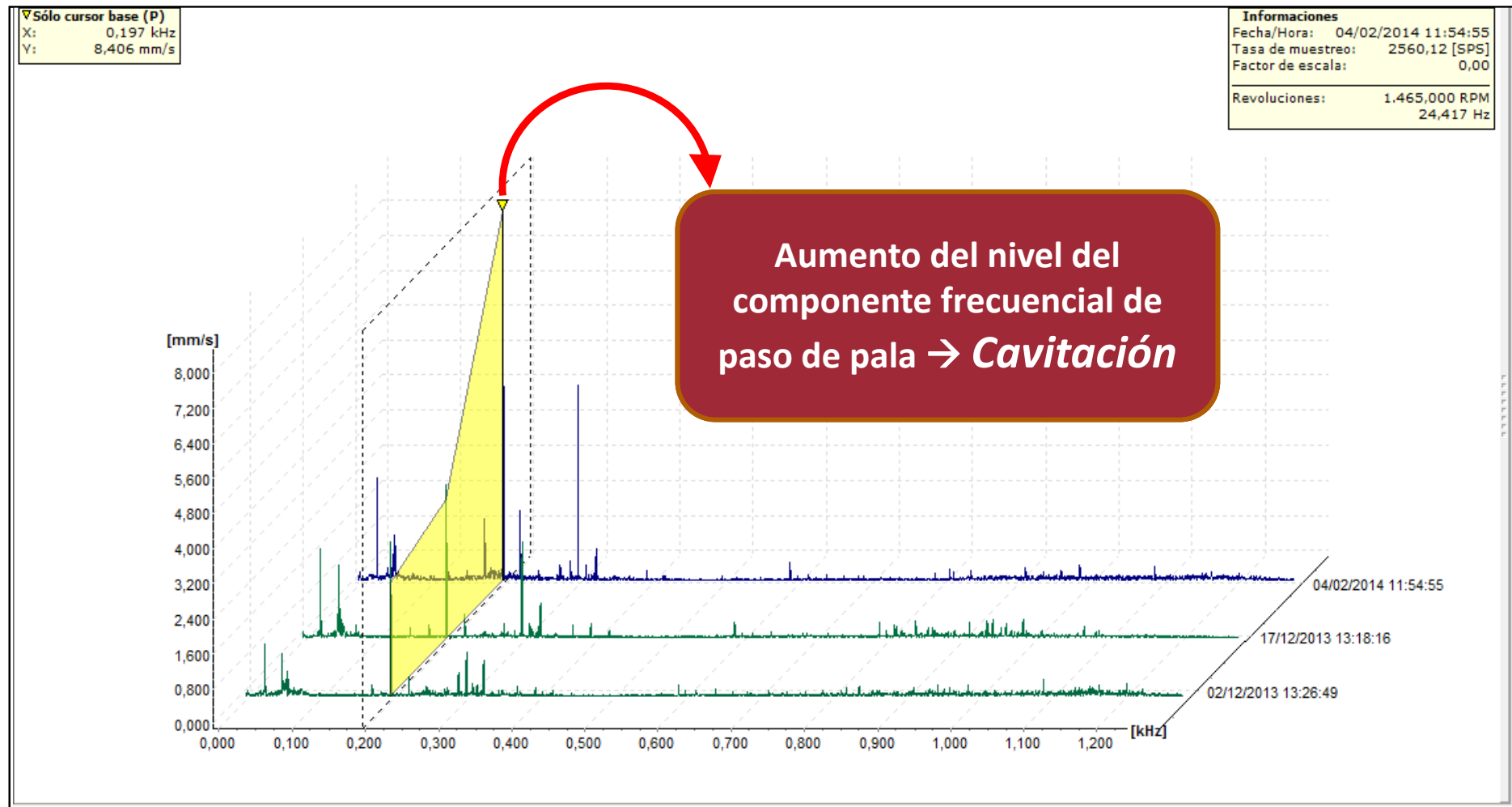
3. Análisis de las medidas y diagnosis.

Mediante las técnicas adecuadas, analizar los cambios producidos respecto del estado basal. Por ejemplo, si se utiliza el *espectro de la vibración*.



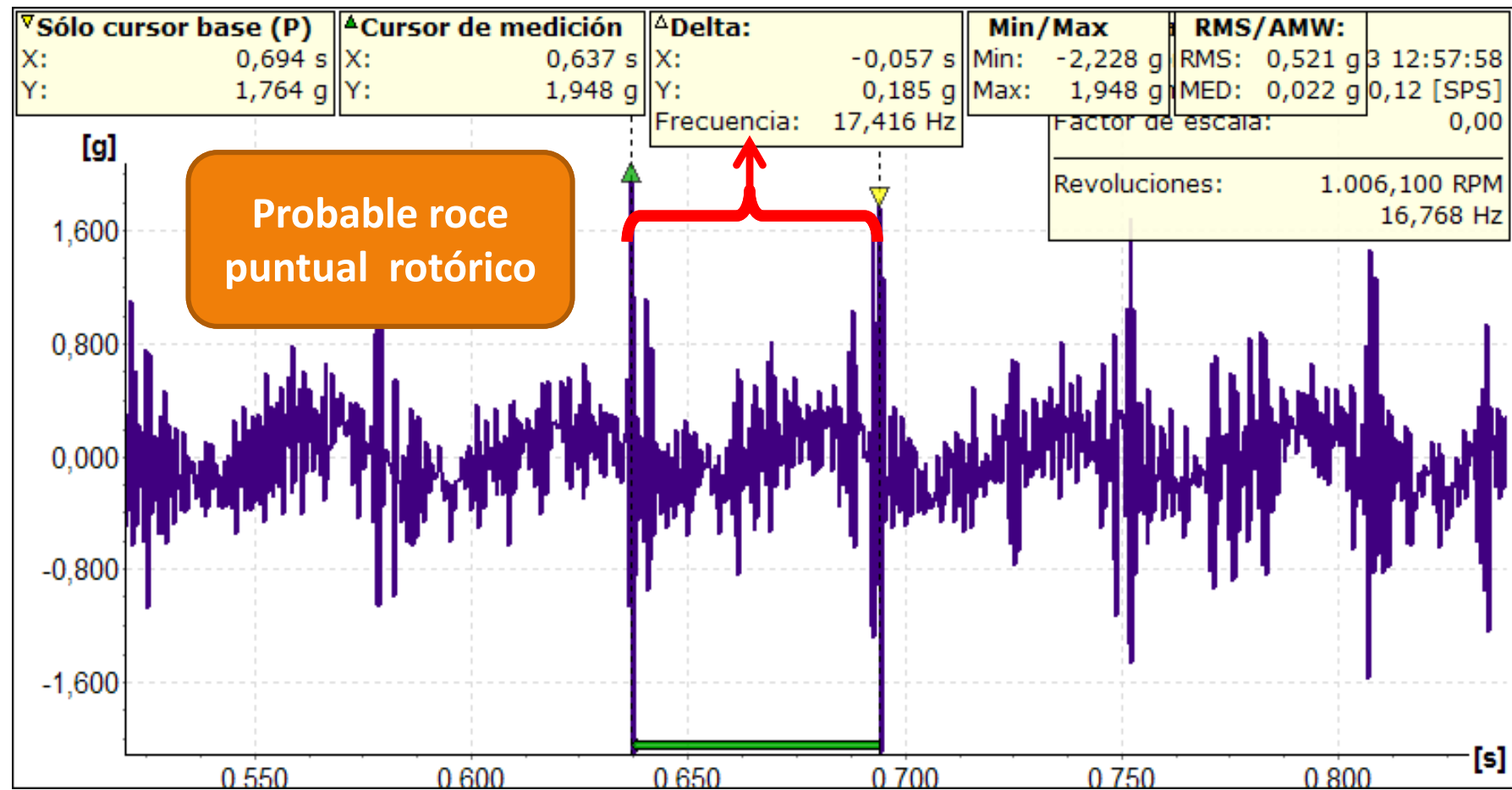
7.4. Método general de diagnosis

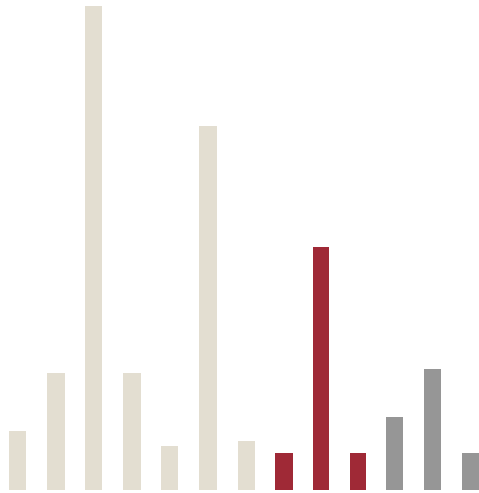
Si, además, se utiliza la evolución espectral (*análisis del mapa espectral*).



7.4. Método general de diagnosis

Si se dispone de la señal temporal de la vibración (*análisis de la forma de onda*).





TEMA 8

TÉCNICAS DE INSPECCIÓN DIRECTA DE EQUIPOS

Ingeniería del Mantenimiento Industrial



ÍNDICE

- 8.1. Inspección visual
- 8.2. Líquidos penetrantes
- 8.3. Partículas magnéticas
- 8.4. Inspección radiográfica
- 8.5. Ultrasonidos
- 8.6. Análisis del lubricante

8.1. INSPECCIÓN VISUAL

- La inspección visual directa de la máquina, o elementos de esta, es aparentemente muy simple, pero requiere de gran conocimiento del equipo y, además, puede llegar a ser bastante compleja si se hace uso de instrumentación sofisticada, tales como:
 - Utilización de microscopios
 - Uso de lámparas estroboscópicas
 - Utilización de sistemas endoscópicos, etc.
- Su *sensibilidad* se limita a aquellos defectos que son visibles, tales como desgaste o grietas superficiales, soldadura de los elementos de fijación, cambios de color, corrosión, huellas en los cojinetes, etc.
- Son numerosos los casos en los que el origen de algún defecto sólo es descubierto tras un minucioso examen visual de las "huellas" del mismo.

8.1. Inspección visual

- Ventajas de la inspección visual directa
 - Simplicidad
 - Escaso coste
 - Rapidez de utilización
- Inconvenientes
 - La falta de accesibilidad de muchos elementos de la máquina
 - A veces, necesidad de desmontar o, al menos, parar la máquina;
 - Sólo pueden observarse defectos superficiales,
 - Pasan inadvertidos los fallos internos del material, o bien aquellos que quedan ocultos por la pintura, el óxido o la suciedad de las superficies.
- Como medio de diagnosis requiere gran experiencia:
 - Conocer las relaciones causa-efecto entre algunas evidencias
 - Saber identificar pequeños indicios de un defecto.

8.2. LÍQUIDOS PENETRANTES

- Se trata de un ensayo no destructivo (END) cuya finalidad es encontrar grietas o fallos en el material que afloran a la superficie.
- La técnica consta de los siguientes pasos (Fig. 8.1):
 1. Limpieza de la superficie del material a ser estudiado (la superficie debe quedar libre de cualquier revestimiento o pintura).
 2. Aplicación de una capa uniforme de un líquido especial (visible o ultravioleta) sobre la superficie a inspeccionar (Figs. 8.2a y 8.2b).
 3. Dejar transcurrir un cierto tiempo para que el líquido rellene los fallos superficiales, pero sin que llegue a secarse.
 4. Quitar los restos de líquido en la superficie.
 5. Aplicar un *revelador* (producto en spray o pliego muy absorbente)
 6. Examinar las huellas depositadas sobre el *revelador* para detectar y evaluar la dimensión de los fallos (Figs. 8.3a, 8.3b y 8.3c).

8.2. Líquidos penetrantes

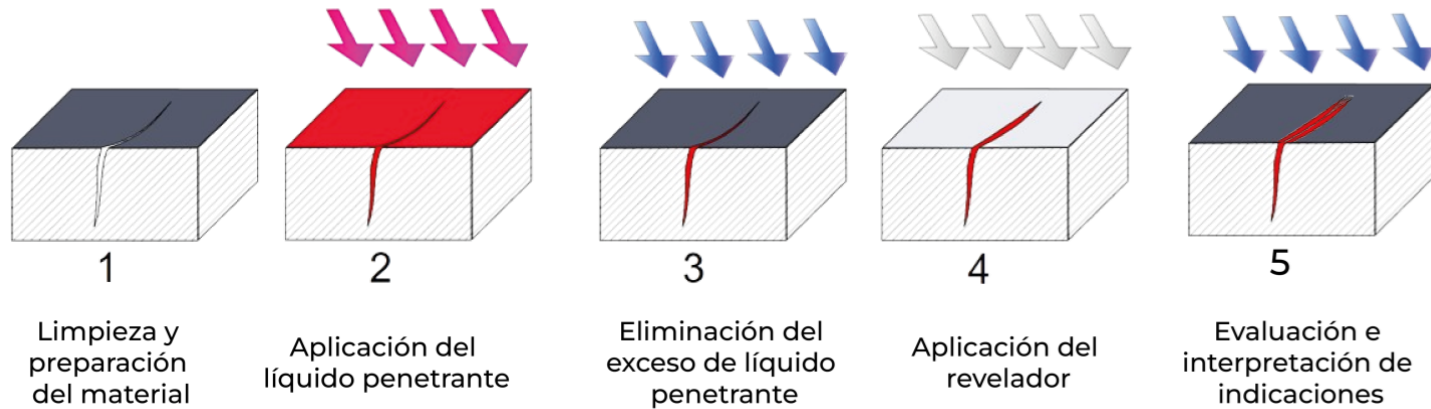


Figura 8.1



Figura 8.2a

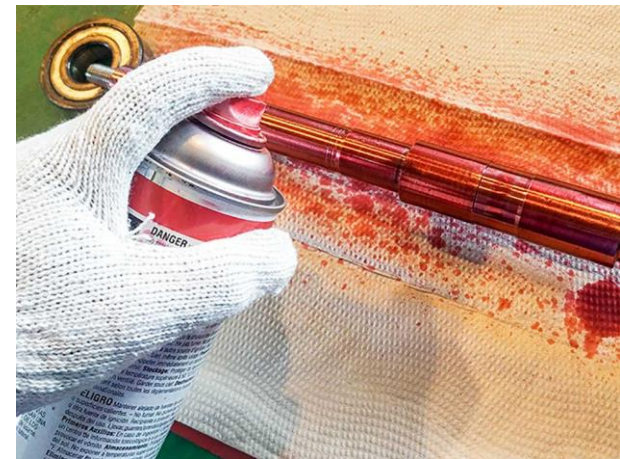


Figura 8.2b

8.2. Líquidos penetrantes



Figura 8.3a



Figura 8.3b

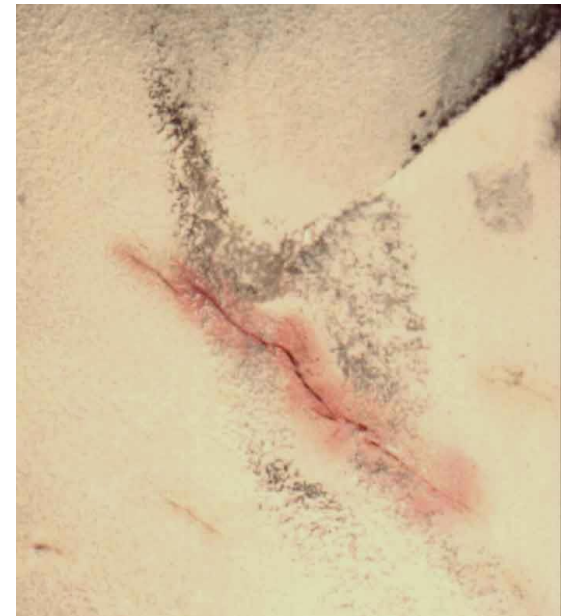


Figura 8.3c

8.3. PARTÍCULAS MAGNÉTICAS

- Es un END para detectar grietas o fallos superficiales o próximos a la superficie del material.
- Se basa en la magnetización de un material ferromagnético al ser sometido a un campo magnético. Por tanto, no es adecuada cuando el material a examinar no puede magnetizarse (bronce, aluminio...).
- El proceso consta de los siguientes pasos:
 1. Se comienza limpiando concienzudamente la superficie del material a ser estudiado.
 2. Es preferible (aunque no necesario) que la superficie quede libre de cualquier revestimiento, óxido, aceite, grasa o pintura, que puedan alterar la distribución de flujo magnético sobre el material.
 3. Aplicar un campo magnético uniforme sobre el material.
 4. Esparcir partículas magnéticas de pequeña dimensión sobre la superficie a examinar.
 5. Las partículas se adaptarán a las líneas del campo magnético sobre la superficie.
 6. Examinando la forma de distribuirse las partículas, pueden extraerse conclusiones acerca de las discontinuidades del material.

8.3. Partículas magnéticas

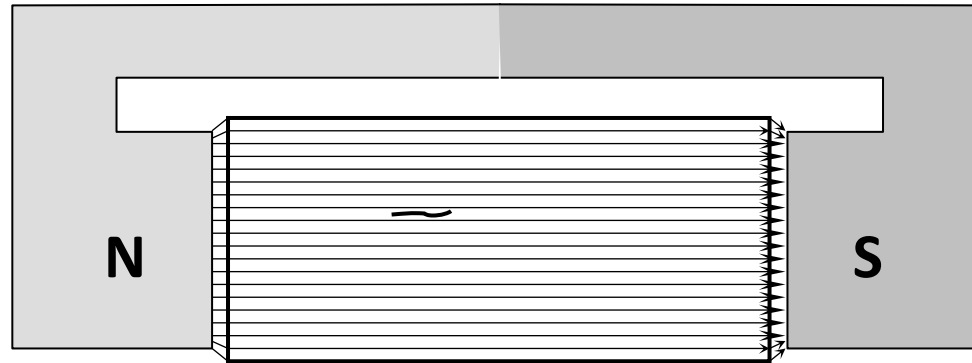


Figura 8.4. Pieza con una grieta en la misma dirección que el campo magnético.

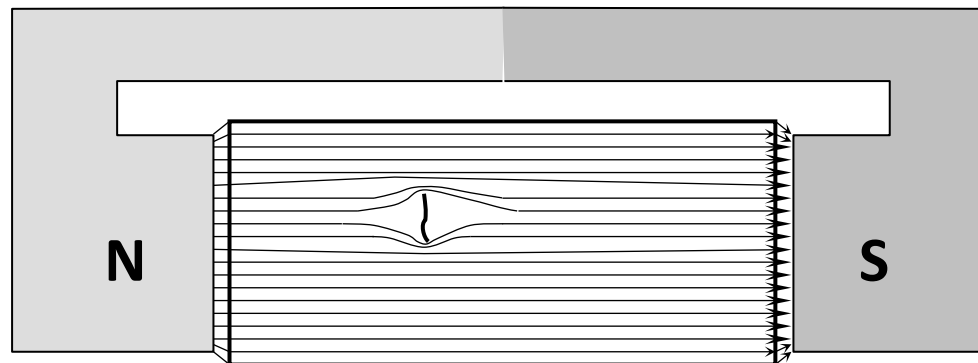


Figura 8.5. Pieza con una grieta en dirección perpendicular al campo magnético.

8.4. INSPECCIÓN RADIOGRÁFICA

- Está especialmente indicada para la detección de fallos internos del material.
- Esta técnica se basa en las diferencias en los niveles de absorción que experimenta una determinada radiación electromagnética, emitida por una determinada fuente de energía, al atravesar diferentes medios. De esta forma es posible detectar la presencia de heterogeneidades en un medio cuando este no sea homogéneo.
- Heterogeneidades de contornos bien definidos pueden ser reconocidas por un experto con cierta facilidad, como es el caso de grietas, poros, depósitos de residuos o incrustaciones de cierto tamaño.
- Sin embargo, dado que la dirección de la radiación determina la proyección de la imagen sobre la placa radiográfica, si la heterogeneidad se desarrolla en la misma dirección que la radiación puede no ser detectadas.

8.4. Inspección radiográfica

- Por tanto, si quiere realizarse un análisis exhaustivo deberá inspeccionarse, al menos, en dos direcciones distintas.
- Además de su elevado coste, presentan el gran inconveniente del efecto altamente dañino que producen los rayos X sobre el cuerpo humano.
- No obstante, la inspección radiográfica es una de las técnicas más utilizadas para el examen de uniones soldadas.

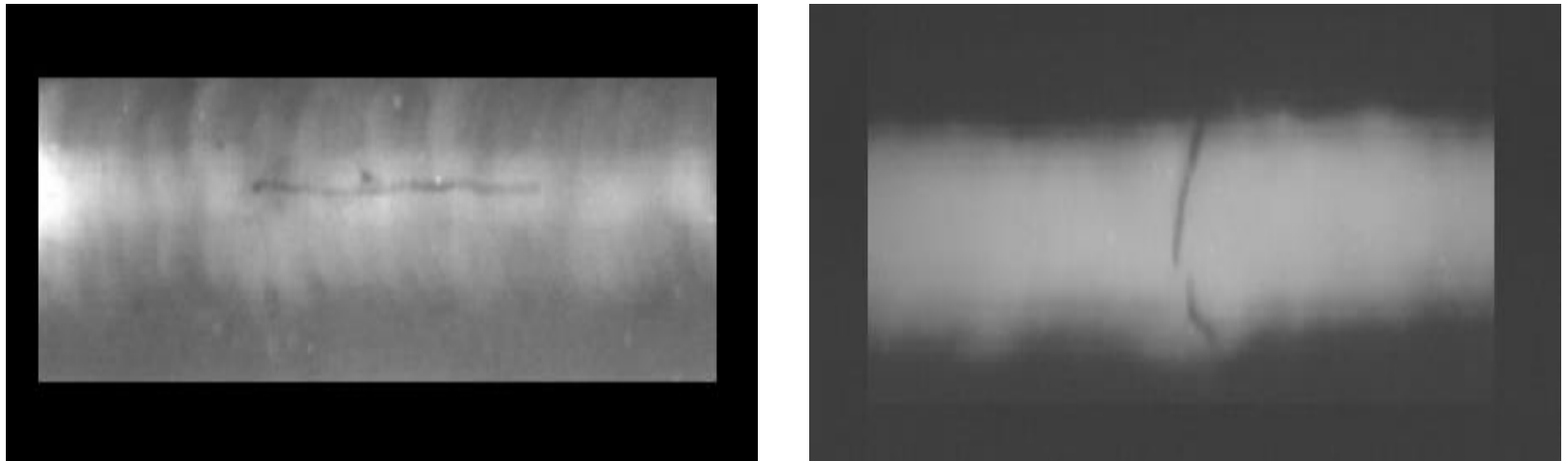


Figura 8.6. Radiografías de cordones de soldadura defectuosos.

8.5. ULTRASONIDOS

- Se denominan ultrasonidos a aquellas ondas cuya frecuencia es más elevada que el umbral superior de audibilidad humana, que se encuentra en torno a los 20 kHz, aproximadamente. cuando se trata de frecuencias superiores a 10^9 Hz se habla de *hipersonidos*.
- Son ondas elásticas de la misma naturaleza que el sonido, producidas por movimientos vibratorios. Al igual que las ondas sónicas o audibles, los ultrasonidos requieren un medio material para propagarse, es decir, no se propagan en el vacío.
- Su velocidad de propagación es una constante para cada material para unas condiciones de presión y temperatura dadas. En los materiales sólidos esta velocidad apenas varía al hacerlo las condiciones físicas, sin embargo, en los medios líquidos o gaseosos sí se observan variaciones relevantes.

8.5. Ultrasonidos

- Materiales como el hierro, níquel o volframio tienen velocidades de propagación longitudinal comprendidas entre 5,5 y 6 km/s; en el corcho es de 0,5 km/s; en el agua a 20°C está cerca de 1,5 km/s; mientras que en el aire, en condiciones estándar, es de 0,33 km/s.
- Los ultrasonidos se pueden generar y detectar mediante distintos procedimientos, pero el más utilizado es el que se basa en el fenómeno de piezoelectricidad.
- Existen tres líneas principales de aplicación de las técnicas de inspección por ultrasonidos:
 - Análisis de materiales para la detección de grietas y fallos internos.
 - Análisis de rodamientos por medición de sus emisiones ultrasónicas.
 - Análisis del estado de cierres por detección de emisiones ultrasónicas.Únicamente la primera de ella es una técnica de inspección directa, mientras que las otras dos son técnicas de inspección indirecta ya que se estudia el estado de un elemento sin observarlo, sino a través del sonido que produce.

8.6. ANÁLISIS DEL LUBRICANTE

La lubricación

- Un lubricante líquido es un fluido mezcla compleja de aceites bases y aditivos químicos (entre el 10 y el 20%) que puede realizar diversos servicios en los mecanismos de un equipo.
- La selección del aceite adecuado y su cuidado es uno de los principales objetivos que se deben conseguir para que el sistema trabaje en condiciones óptimas durante su vida útil.
- Esta selección del lubricante adecuado debe ser una responsabilidad compartida entre el usuario de la máquina, el fabricante de los componentes mecánicos y el fabricante o suministrador del aceite.
- La lubricación interna de los motores de combustión interna es fundamental para su funcionamiento, ejerciendo una influencia capital sobre el rendimiento y seguridad del mismo, pero también en las transmisiones de engranajes, cierres mecánicos, etc.

8.6. Análisis del lubricante

Funciones de los lubricantes

- Las funciones que desempeñan los aceites lubricantes en un sistema mecánico son las siguientes
 1. Disminución de las pérdidas por rozamiento.
 2. Protección de los elementos mecánicos contra el desgaste y la oxidación.
 3. Evacuación de calor de los elementos lubricados.
 4. Recepción de las impurezas, partículas del desgaste o agentes contaminantes.

8.6. Análisis del lubricante

Métodos de análisis del lubricante

- **Métodos de detección directa.** Haciendo circular al aceite a través de un dispositivo que permite detectar de alguna manera las partículas contaminantes. El método más simple es la observación, en un **vaso transparente** interpuesto en el circuito, de la turbidez del aceite.
- **Métodos de recolección de partículas.** Las partículas son recolectadas en algún dispositivo interpuesto en el circuito de lubricación. El principal exponente de estos métodos consiste en la utilización de **filtros**, dentro de una amplia gama de posibilidades. Otra técnica, encaminada a la detección de partículas procedentes del desgaste, se basa en la retención de ciertas partículas metálicas en **dispositivos magnéticos**.
- **Análisis de muestras del lubricante.** Consiste en la extracción de una muestra del lubricante para proceder a su análisis. Existe una gran variedad de técnicas distintas de análisis, cada una de las cuales presenta unas características propias. Algunas de las más utilizadas son: la **espectrometría**, la **ferrografía**, la **medición de la constante dieléctrica**, el estudio de la **mancha de aceite**, el **análisis de viscosidad**, etc.

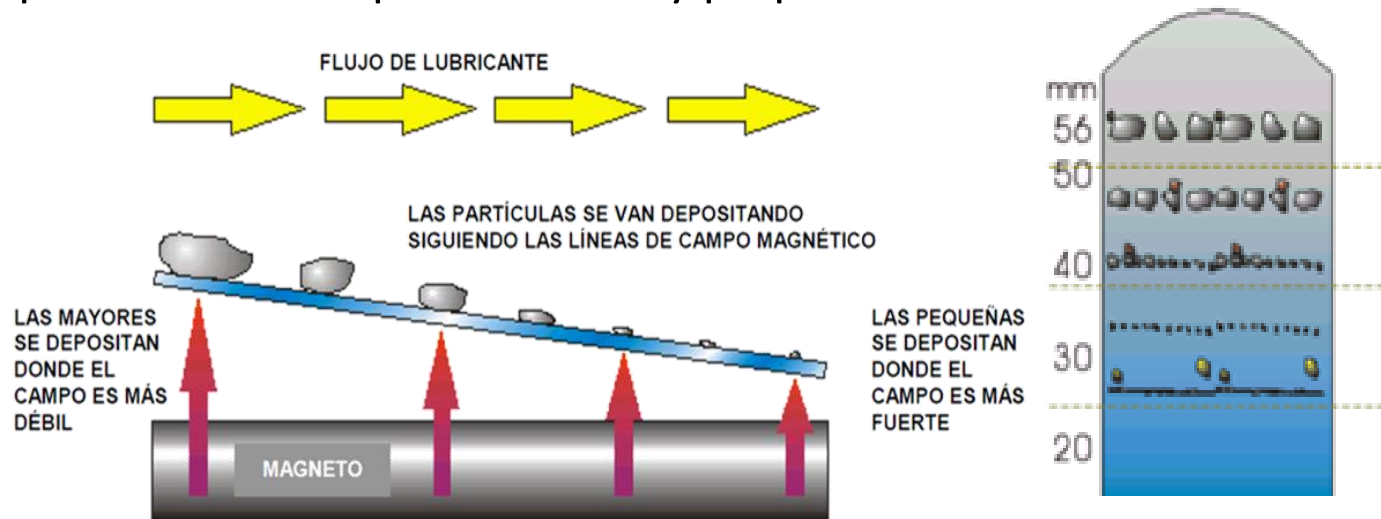
8.6. Análisis del lubricante

Análisis óptico de partículas

- Permite hacer un seguimiento del estado del lubricante pero también del desgaste de las máquinas (como técnica de inspección indirecta).
- Analizando las partículas contenidas en el lubricante es posible estudiar los mecanismos de fallo de la máquina mediante:
 - La distribución de los tamaños de las partículas
 - La forma de las partículas.
- Las técnicas utilizadas para ello son:
 - Ferrografía
 - Análisis óptico de partículas (tras a algún método de filtrado o retención).
- El análisis de partículas entre 4 y 100 micras es útil para la detección de los fallos mecánicos en gran variedad de sistemas lubricados.

8.6. Análisis del lubricante

- Mediante un equipo de análisis óptico o un ferrógrafo se puede ver la silueta de las partículas, mediante una luz contrapuesta, pero también su color, textura y posibles marcas si se dispone de una fuente de luz en el mismo lado de la observación.
- Un ferrógrafo utiliza un campo magnético para retener las partículas ferromagnéticas contenidas en una pequeña muestra de aceite que, por gravedad, desliza sobre una superficie lisa. Dispone de un microscopio para poder visualizar partículas muy pequeñas.



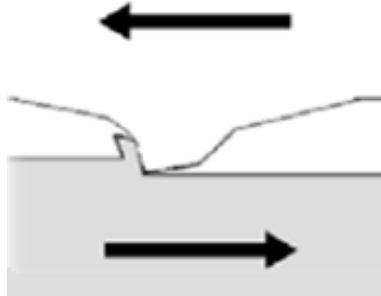
8.6. Análisis del lubricante

- Las partículas contenidas en el lubricante pueden provenir del desgaste de las superficies que lubrica o por la contaminación del mismo por agentes (sólidos, líquidos o gases) del medio.
- Los mecanismos más frecuentes que dan lugar a partículas de desgaste son los siguientes:
 - Abrasión
 - Adhesión
 - Corrosión
 - Erosión
 - Fatiga
 - Cavitación
- Seguidamente se explican estos mecanismos de desgaste y, a continuación, se muestran los tipos de partículas que con más frecuencia suelen encontrarse.

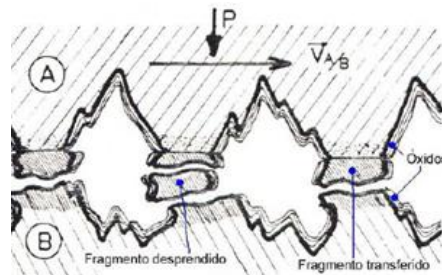
8.6. Análisis del lubricante

**DESGASTE POR
ABRASIÓN**

Es el tipo de desgaste más común en la industria y se da cuando partículas o superficies duras son arrastradas o presionadas sobre otra superficie produciendo ralladuras o desprendiendo fragmentos.

**DESGASTE POR
ADHESIÓN**

Se debe al cizallamiento producido por las micro-soldaduras generadas cuando las superficies se mueven produciendo elevadas temperaturas y presiones puntuales.

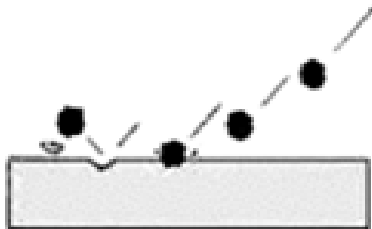
**DESGASTE POR
CORROSIÓN**

Se produce por la aparición de un levantamiento por fricción mecánica de los productos de reacción formados por el ataque químico o electroquímico de los agentes del entorno o por productos de degradación del propio lubricante.

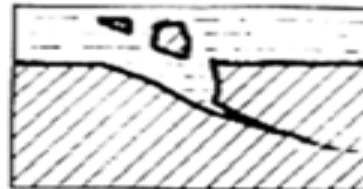
8.6. Análisis del lubricante

DESGASTE POR EROSIÓN

Es consecuencia de repetidos impactos de pequeñas partículas en suspensión en un medio líquido o gaseoso.

**DESGASTE POR FATIGA**

Aparece en superficies de rodadura o deslizamiento con altas cargas alternas, produciendo grietas bajo la superficie que acaban desprendiendo material.

**DESGASTE POR CAVITACIÓN**

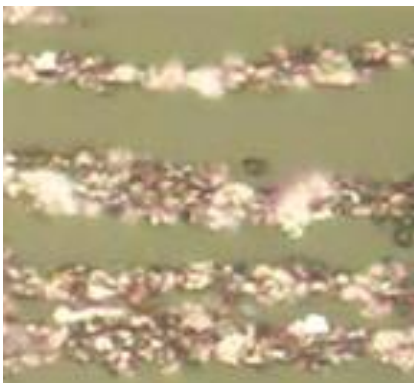
Se inicia por la aparición de burbujas de vapor en regiones donde la presión es inferior a la presión de vapor del líquido.

Al aumentar la presión, las burbujas implosionan violentamente arrancando partículas de material de las superficies próximas.

8.6. Análisis del lubricante

PARTÍCULAS DESGASTE NORMAL

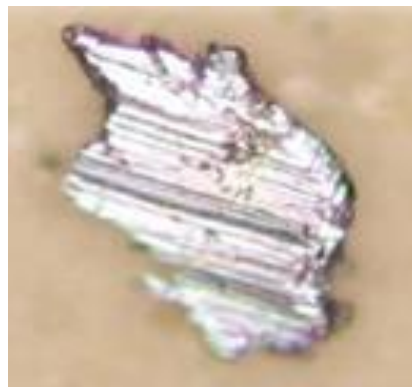
Son partículas generadas por el contacto adhesivo de los cuerpos metálicos. Su forma es similar a escamas metálicas de superficie relativamente lisa y no suelen presentar colores de oxidación.



PARTÍCULAS DE DESLIZAMIENTO

Se producen por desgastes generados por adhesión y/o abrasión debidos a cargas o velocidades excesivas o fallos de lubricación.

Presentan estriaciones en la superficie, bordes rectos y perfiles afilados.



PARTÍCULAS DE CORTE

Se deben a fenómenos de desgaste por corte y su presencia es indicativa de roces importantes.

Tienen el aspecto de virutas rectas curvadas o en espiral.



8.6. Análisis del lubricante

PARTÍCULAS DE FATIGA

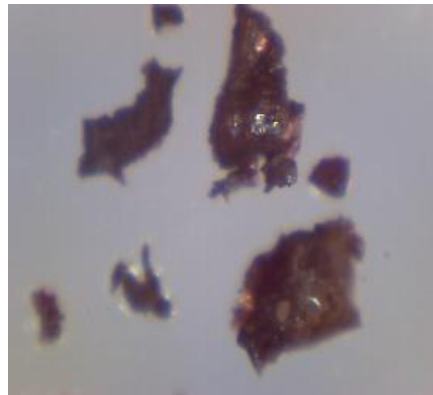
Tienen su origen en elementos con cargas cíclicas

Presentan geometría esférica o equiaxial y una superficie sin excesivas irregularidades.



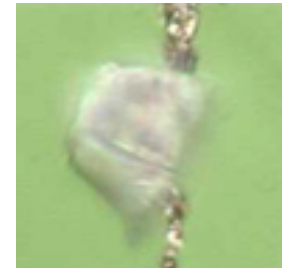
PARTÍCULAS DE ÓXIDOS FERROSOS

Pueden ser originadas por: calentamientos excesivos. (oscuros), humedad en lubricante (rojos), falta de lubricación (beta), contaminación con agua o con compuestos químicos corrosivos.

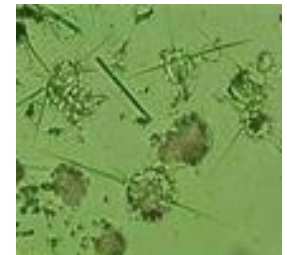


OTRAS PARTÍCULAS

POLVO AMBIENTAL



FIBRAS



POLÍMEROS DE FRICCIÓN



8.6. Análisis del lubricante

- Siluetas típicas de partículas de corte



- Siluetas típicas de partículas de fatiga

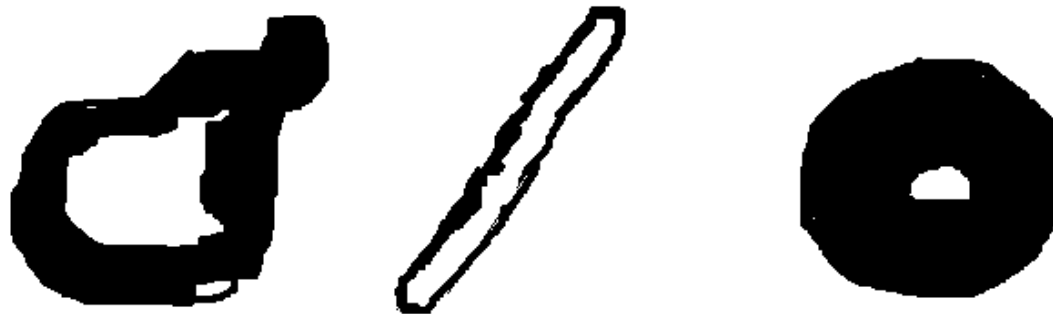


8.6. Análisis del lubricante

- Siluetas típicas de partículas de deslizamiento



- Siluetas típicas de otras partículas



1. Óxido

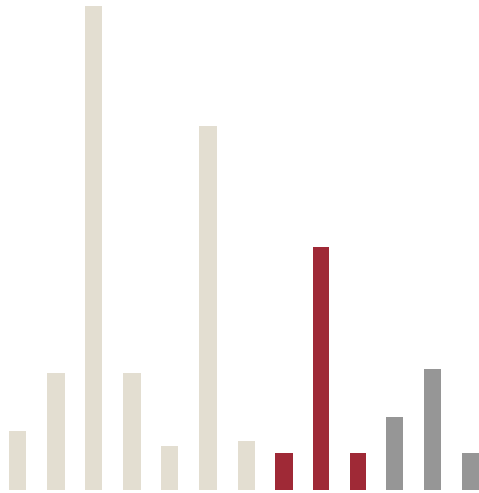
2. Fibra

3. Agua

8.6. Análisis del lubricante

Medida de la Constante Dieléctrica

- La constante dieléctrica es una constante física adimensional propia de cada material que expresa la capacidad para polarizarse en un campo eléctrico comparada con el vacío.
- Se obtiene como cociente de la capacidad de un condensador cuando el dieléctrico es el material respecto a la que tiene si entre las placas estuviera el vacío.
- En el aceite esta propiedad depende del aceite base y de los aditivos y varía durante el uso por la degradación y contaminación del aceite.
- La variación de la constante dieléctrica se debe a que durante el uso del aceite se forman compuestos como los peróxidos, ácidos, etc. que convierten a las moléculas del aceite en polares, aumentando el valor de la constante.
- Los elementos contaminantes como el agua, metales, etc. también producen un incremento de la constante dieléctrica.
- La medición de la constante dieléctrica puede hacerse mediante sensores de capacitancia. El principio de medida de estos sensores se basa en que el aceite nuevo y el usado tienen constantes dieléctricas diferentes.



TEMA 9

TÉCNICAS DE INSPECCIÓN INDIRECTA DE EQUIPOS

Ingeniería del Mantenimiento Industrial



UNIVERSIDAD DE
MURCIA

ÍNDICE

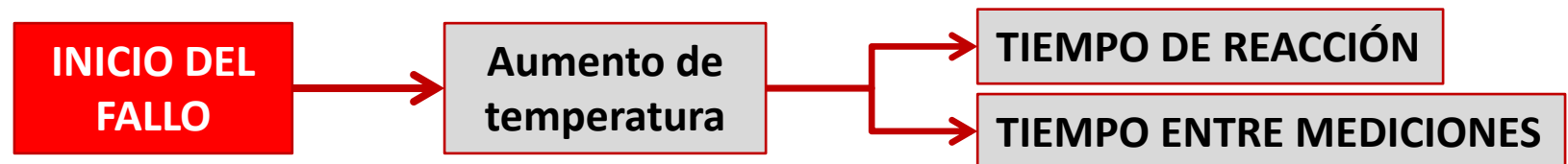
- 9.1. Medida de la presión
- 9.2. Medida de la temperatura
- 9.3. Termografía

9.1. MEDIDA DE LA PRESIÓN

- Dependiendo del tipo de máquina, la medida de la presión puede referirse a la presión de proceso o a la presión del circuito de lubricación.
- La medida de la presión presenta dos aspectos de interés:
 - Valor medio
 - Estabilidad del valor instantáneo en torno al valor medio.
- En lo que se refiere a la presión de proceso, el conocimiento de los dos extremos indicados puede aportar información muy útil en el examen de defectos tales como la cavitación, la condensación del vapor o la existencia de golpes de ariete.
- En cuanto a la presión de lubricación, algunas anomalías funcionales en los cojinetes, o ciertos problemas en los cierres, pueden ser consecuencia directa de una presión de lubricación insuficiente o poco estable.

9.2. MEDIDA DE LA TEMPERATURA

- La temperatura que se alcanza en diferentes elementos de una máquina es un dato fundamental para predecir su estado funcional.
- La medida de la temperatura es, en algunos casos, un parámetro determinante para decidir la parada de un equipo, puesto que cuando sobrepasa cierto valor de alarma su evolución hacia el fallo es muy rápida e inevitable. Tal es el caso de:
 - La temperatura de un circuito de lubricación.
 - La temperatura de un refrigerante.
 - La temperatura de un bobinado.
 - La temperatura de un rodamiento, cojinete de deslizamiento, etc.
- El problema consiste en saber cuánto tiempo transcurre desde que se detecta un aumento de temperatura significativo y el subsiguiente fallo.



9.2. Medida de la temperatura

Temperatura de lubricación

- Una de las propiedades más importantes de un lubricante es su viscosidad. El requisito básico para un lubricante es que posea la viscosidad correcta a la temperatura de trabajo.
- Una elevación excesiva de la temperatura de trabajo, produce una disminución peligrosa de la viscosidad del lubricante, de modo que la película de lubricante puede llegar a romperse, en cuyo caso se produciría el contacto entre las superficies en movimiento, con las múltiples consecuencias negativas que ello acarrea siempre.

9.2. Medida de la temperatura

Temperatura en los rodamientos y cojinetes de deslizamiento

- La medida de la temperatura en los rodamientos y en los cojinetes es una práctica habitual en las máquinas críticas de un proceso, llegando en algunos casos a producirse una condición de alarma o de parada de la máquina cuando se sobrepasa un valor prefijado.
- La aparición de un deterioro en los caminos de rodadura de un rodamiento, produce siempre un aumento de su temperatura de trabajo, sin embargo, ésta no evoluciona hasta valores altos más que poco tiempo antes de producirse la destrucción del rodamiento. Por lo tanto, la elevación de la temperatura constituye una **indicación débil del estado del rodamiento**, pero es muy adecuada como síntoma de alarma si se monitoriza para evitar el fallo del mismo.
- El aumento de la temperatura de trabajo de un rodamiento tiene consecuencias negativas para el lubricante utilizado, que verá disminuida su viscosidad.

9.2. Medida de la temperatura

- Valores muy elevados de la temperatura, pueden producir alteraciones en el color del material, dilataciones excesivas que pueden llevar al agarrotamiento de los cuerpos rodantes o, incluso, producir la fusión del material.
- La falta de lubricante y, aunque en menor medida, también el exceso se manifiestan por un aumento de temperatura.
- Otros motivos frecuentes de aumento de temperatura, además del deterioro de las superficies, son:
 - la presencia de impurezas o agentes contaminantes en el lubricante,
 - un juego inadecuado,
 - el roce excesivo con las obturaciones y
 - las sobrecargas.

9.2. Medida de la temperatura

Temperatura de los bobinados

- El control de la temperatura de los bobinados se viene haciendo de forma sistemática en las grandes máquinas eléctricas, donde las corrientes pueden alcanzar valores elevados.
- Mediante termostatos se puede actuar sobre los sistemas de refrigeración, como para producir alguna condición de alarma con el fin de proteger los aislamientos y evitar deformaciones de la chapa.
- Desde el punto de vista predictivo, su interés está en la detección de sobrecargas o fallo en los bobinados, bien sea por defecto de aislamiento o por interrupción en alguna fase.
- Un aumento de temperatura en los bobinados, también puede ser consecuencia de un fallo en el sistema de refrigeración, ya que el calor generado por el paso de la corriente eléctrica encuentra mayores dificultades para su evacuación.

9.2. Medida de la temperatura

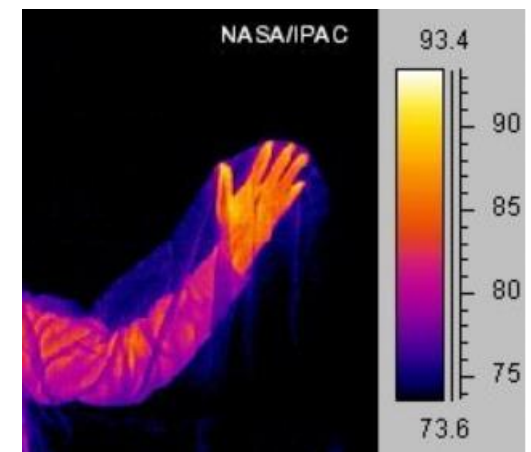
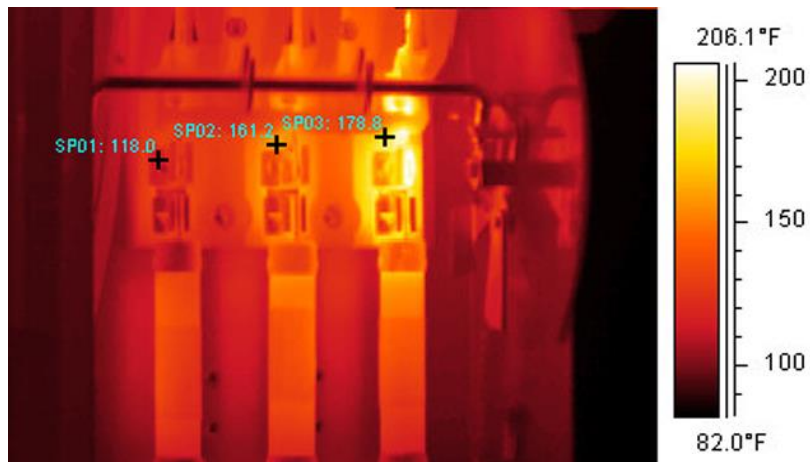
Temperatura del refrigerante

- Una de las principales limitaciones a la potencia de una máquina, es la elevación de su temperatura con la carga.
- Los sistemas de refrigeración tienen por finalidad mantener una temperatura correcta de trabajo, mediante la evacuación del calor generado durante el funcionamiento.
- Por lo tanto, un aumento de la temperatura en el circuito de refrigeración es indicativo de una condición funcional anómala en la marcha del equipo o en el sistema auxiliar de refrigeración.
- Una de las consecuencias de una elevación excesiva de la temperatura en el refrigerante, es la dilatación de los materiales por encima de los valores de tolerancia previstos.
- Algunos defectos en equipos rotativos como: desalineación, roce, excentricidades, agarrotamientos, deformaciones en la carcasa, etc., pueden explicarse a partir de unos valores de temperatura elevados.

9.3. TERMOGRAFÍA

- Es sabido que en muchos componentes de los equipos aumenta la temperatura cuando empeora su estado o sus condiciones funcionales.
 - En un rodamiento en mal estado o con poca lubricación los roces metal/metal aumentan lo que origina pérdidas por desgaste que se convierten en calor.
 - Un bobinado con sobrecarga genera más calor por efecto Joule.
 - Un contacto eléctrico defectuoso genera un aumento local de temperatura.
 - Un aislamiento defectuoso proporciona una vía de escape, o de entrada, al calor.
 - Un cierre excesivamente apretado provoca un aumento de temperatura como consecuencia del exceso de rozamiento.
- La termografía es una técnica que permite “fotografiar” un objeto en la banda de radiación infrarroja y medir su temperatura a distancia, es decir, sin necesidad de contacto físico con el objeto a estudiar.
- Se basa en la captación de la radiación infrarroja emitida por el objeto estudiado, de ahí que la imagen obtenida se denomine termografía.

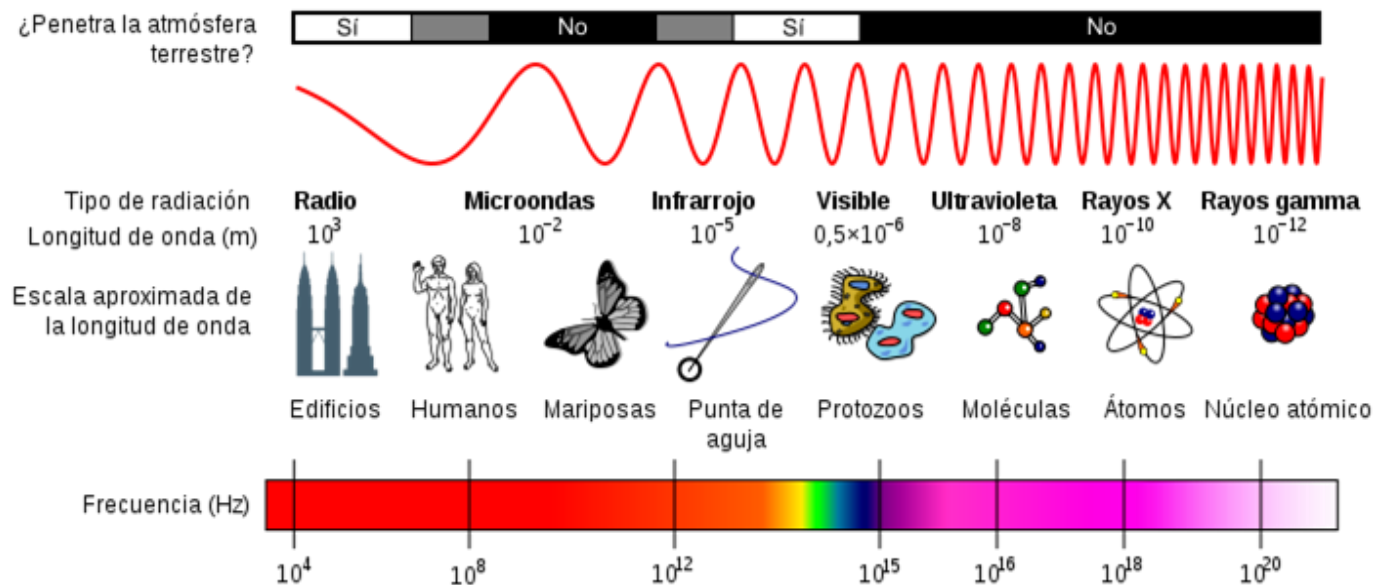
9.3. Termografía



9.3. Termografía

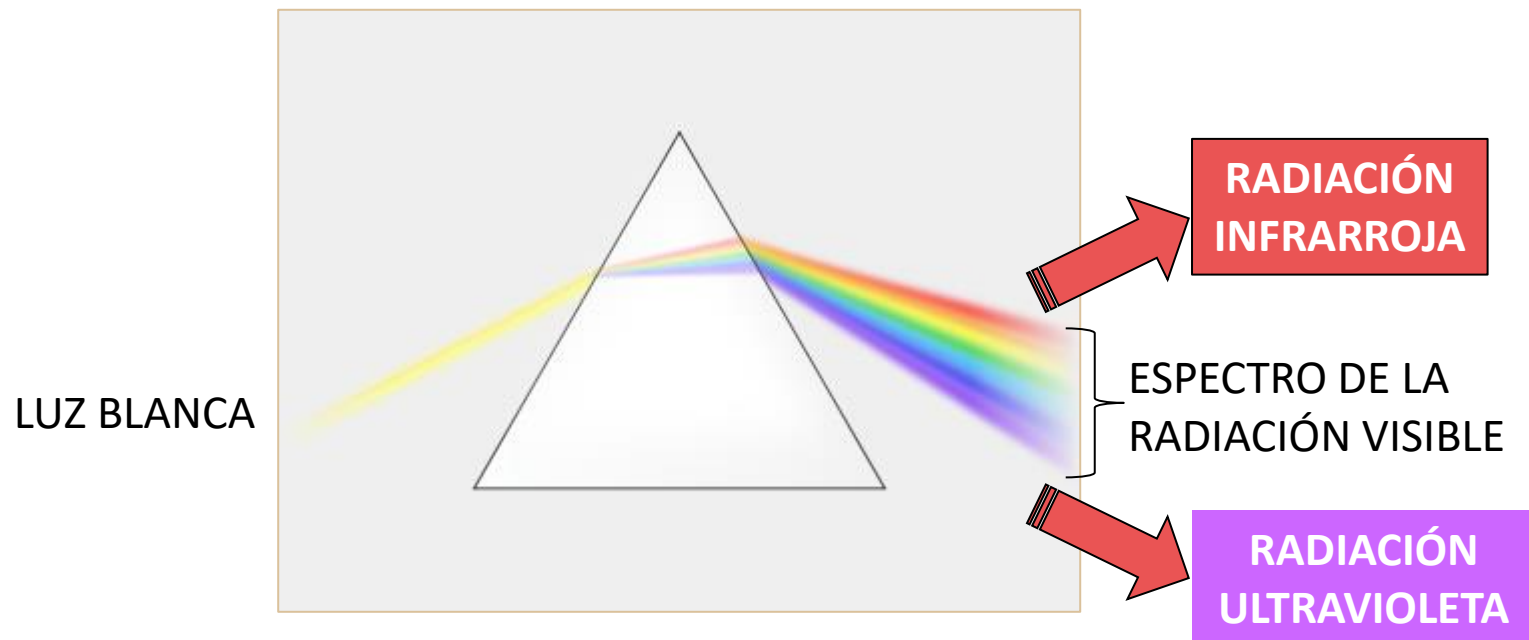
Principios de la termografía

- El espectro electromagnético de un objeto es el rango de la radiación electromagnética que emite (espectro de emisión) o absorbe (espectro de absorción) dicho objeto.
- Esta radiación puede ser propia (una fuente de luz, de calor, etc.), reflejada o transmitida.

**Figura 9.1. Espectro electromagnético**

9.3. Termografía

- La radiación infrarroja fue descubierta hacia el año 1800 por William Herschel.
- Herschel medía con un termómetro de mercurio en el espectro de luz, obtenido con un prisma de cristal, con el fin de averiguar el calor emitido por cada color. Descubrió que el calor era más fuerte al ir más allá del color rojo del espectro, es decir, donde ya no había luz.



9.3. Termografía

- Es un principio de la física (termodinámica) que cuando dos objetos adyacentes se encuentran a diferente temperatura, se produce una transferencia de energía (en forma de calor) de la zona más caliente a la zona más fría. Este proceso se mantiene hasta alcanzar el equilibrio térmico.
- La energía térmica se puede transferir de tres formas:
 - Conducción
 - Convección
 - Radiación
- La energía térmica irradiada se puede producir incluso en el vacío y se transmite a la velocidad de la luz.
- La radiación transmitida por un objeto depende de las diferencias de temperatura y de la superficie del cuerpo radiante.

9.3. Termografía

- Un objeto que emite el máximo posible de energía para su temperatura sería un emisor de radiación perfecto, y se le llama *Cuerpo Negro*.
- En la práctica no hay emisores perfectos y las superficies suelen emitir menos energía que un Cuerpo Negro. Esto es debido a que una parte de la energía irradiada en el interior del objeto es reflejada hacia su interior.
- Del mismo modo, una superficie especular también reflejará una gran cantidad de la energía proveniente del exterior, por lo que creará una imagen de radiación falsa (por ejemplo, hágase un termografía frente a una ventana de cristal).
- Se denomina *Emisividad* de un objeto al cociente entre la energía emitida respecto de la máxima que podría emitir (Cuerpo Negro).

9.3. Termografía

- Una termografía de una superficie metálica pulida es poco fiable, porque emite poco y refleja mucho.
- Esa misma termografía será mucho más fiable si la superficie está pintada o, incluso, algo oxidada.
- Las cámaras termográficas incluyen la emisividad como factor de corrección.
- No obstante, es preferible pintar o pegar cinta adhesiva a las superficies de baja emisividad antes de medir.

Material	Emisividad
Acero brillante	0.18
Acero oxidado	0.85
Latón brillante	0.10
Latón oxidado	0.61
Aluminio brillante	0.05
Aluminio oxidado	0.30
Cemento	0.90
Asfalto	0.90
Ladrillo Rojo	0.93
Grafito	0.85

Valores de emisividad de algunos materiales

9.3. Termografía

Termómetros de radiación infrarroja

- Un termómetro de radiación infrarroja es un dispositivo dotado de un transductor sensible a la banda infrarroja del espectro de radiación electromagnética.
- Generalmente disponen de un haz de luz láser que permite dirigir el sensor hacia la zona cuya temperatura se quiere medir.
- Por las razones explicadas, no es posible realizar una medición certera con un termómetro de infrarrojo en superficies pulidas con brillo. En estas superficies solamente se podrán determinar tendencias de temperatura, pero no valores absolutos.
- La distancia de medición también introduce un error en la medida, especialmente cuando el objeto a estudiar es de pequeñas dimensiones (por ejemplo, una tubería de poco diámetro).

9.3. Termografía

Cámaras termográficas

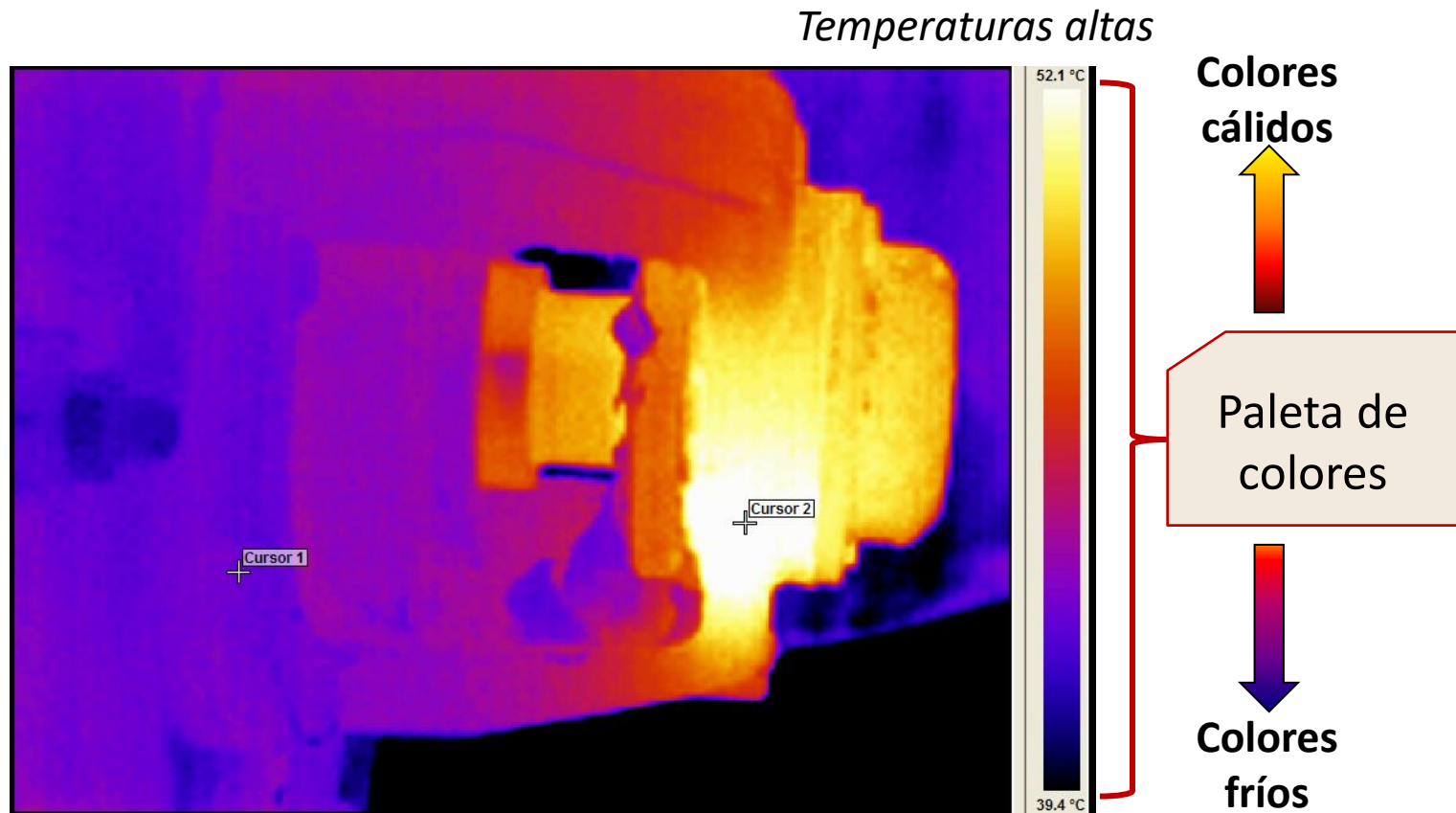
- Una cámara termográfica es un dispositivo dotado de una matriz de transductores sensibles a la banda infrarroja del espectro de radiación electromagnética, al igual que una cámara fotográfica digital lo hace en la banda de radiación visible.
- El nivel de radiación (energía) infrarroja recibida por cada uno de los sensores de la matriz se convierte en una imagen -térmica- que representa dicho nivel en el pixel correspondiente de una pantalla. Por tanto, funcionan como una cámara de fotos en blanco y negro.
- Mediante un sistema electrónico de procesamiento de datos, la imagen (originalmente monocromática) se traduce a una paleta de colores en función de los valores medidos (temperaturas).
- La imagen termográfica en colores permite identificar más fácilmente las zonas de interés de la termografía.

9.3. Termografía

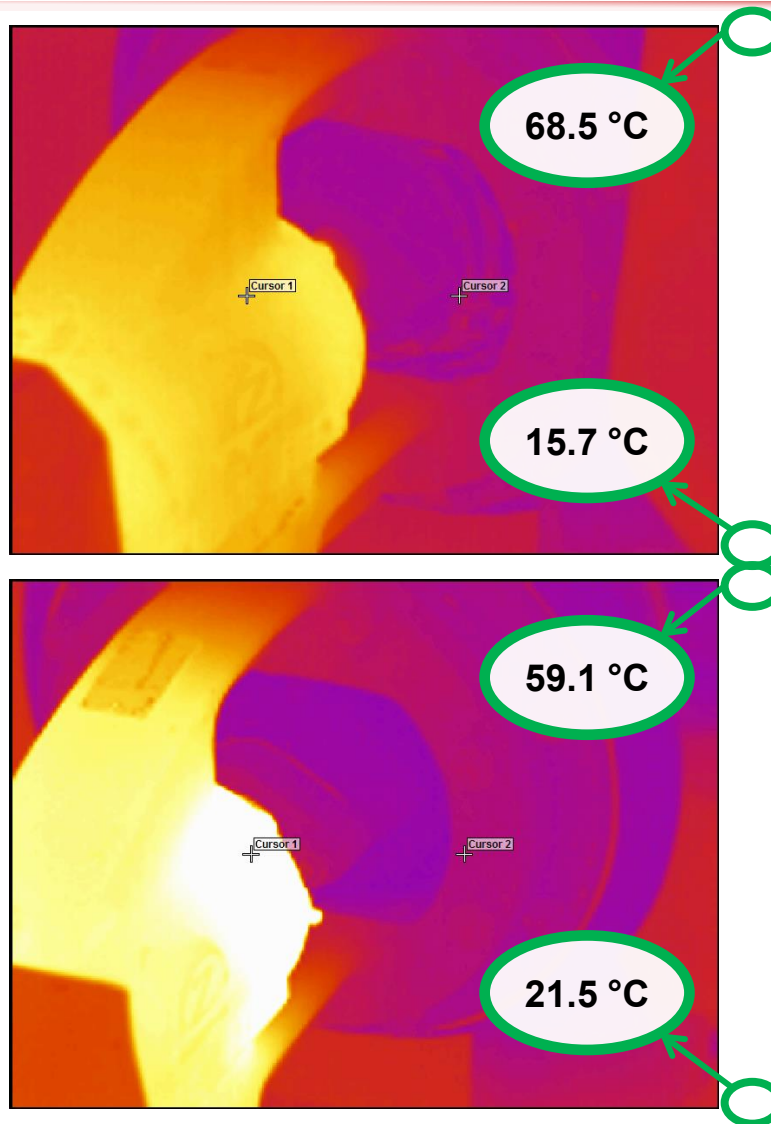


9.3. Termografía

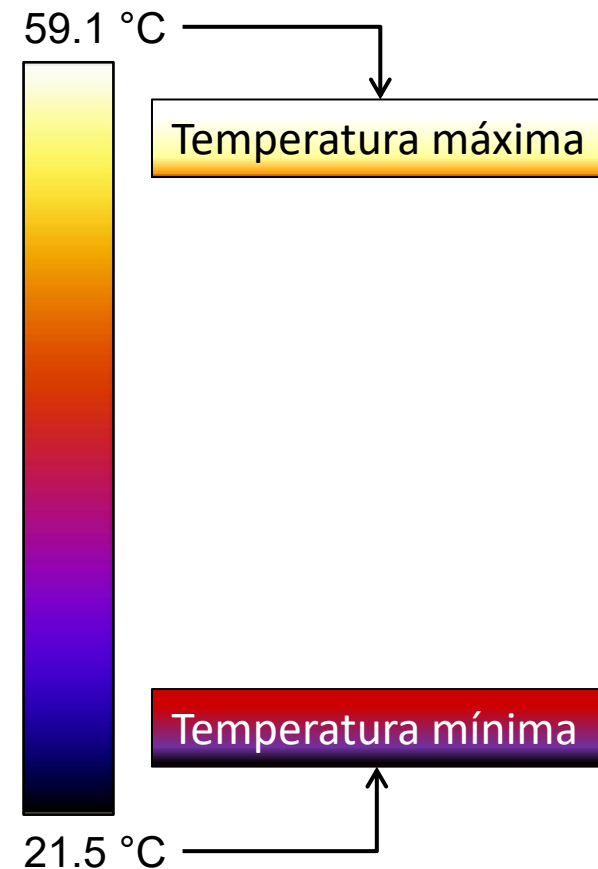
- En una imagen termográfica sólo se distinguen los objetos cuyos niveles de radiación infrarroja ($\approx$ temperatura) son distintos entre sí.

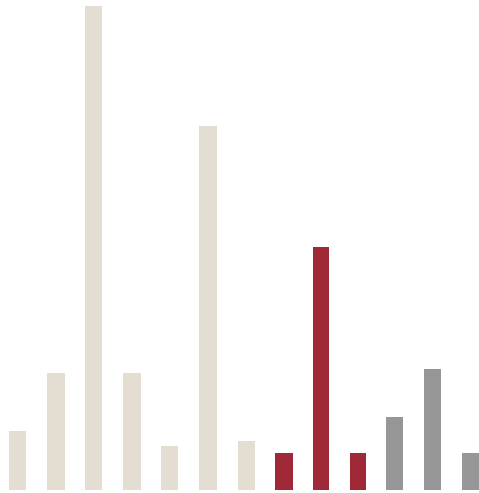


9.3. Termografía



La escala de temperaturas asociada a la paleta de colores de una termografía **no es absoluta**.





TEMA 10

TÉCNICAS BASADAS EN EL ANÁLISIS DE LA VIBRACIÓN

Ingeniería del Mantenimiento Industrial



ÍNDICE

- 10.1. Generalidades
- 10.2. Fundamentos de las vibraciones mecánicas
- 10.3. Sensores para la medida de la vibración
- 10.4. La medida del nivel de severidad de la vibración
- 10.5. La norma ISO 20816
- 10.6. Técnicas para el análisis de la vibración

10.1. GENERALIDADES

- En cualquier máquina en funcionamiento existen vibraciones como consecuencia de holguras, pequeños desequilibrios de carga, rozamientos, tolerancias de ajuste, esfuerzos variables, flexión de los ejes, etc.
- Además, la mayoría de los defectos que pueden aparecer en una máquina (desalineación, desequilibrio dinámico, transmisión en mal estado, cojinetes defectuosos, marcha irregular o con discontinuidades, etc.) vienen acompañados de ciertos cambios funcionales que pueden manifestarse de diversas formas:
 - Disminución del rendimiento
 - Modificación de la temperatura de funcionamiento
 - Cambios en el ruido
 - Aumento y cambio en las vibraciones.

10.1. Generalidades

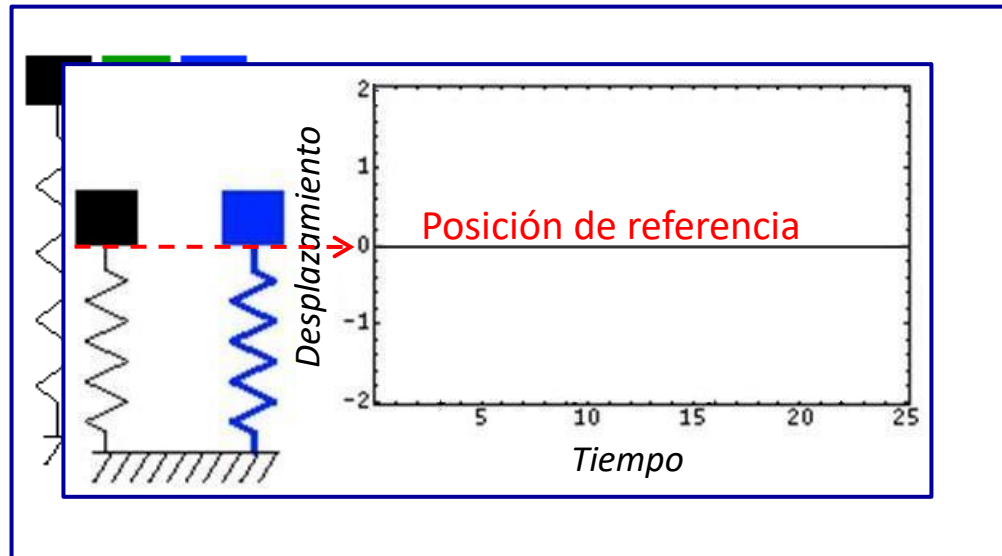
- Dentro del campo del mantenimiento predictivo, las vibraciones que experimenta cualquier máquina o sistema mecánico en funcionamiento destacan de manera notable como una de las manifestaciones susceptible de ser medida con relativa facilidad y que muestra una clara dependencia del estado del mismo.
- Mediante la medida y análisis de la vibración de una máquina se puede realizar un seguimiento de su estado, detectar un funcionamiento anómalo y realizar un diagnóstico de las causas del mismo con el fin de planificar su mantenimiento y, en definitiva, prolongar su período de vida.
- La medida y análisis de la vibración de una máquina se puede plantear bajo múltiples vertientes, desde la simple medida de su nivel (severidad de la vibración) hasta técnicas más complejas basadas en el estudio de formas de onda temporales o análisis en el dominio de la frecuencia.

10.1. Generalidades

- Algunas de las técnicas más utilizadas para el análisis de la vibración son las siguientes:
 - Severidad de la vibración (medida del nivel global de pico, RMS o pico-pico)
 - Forma de onda temporal
 - Análisis de envolvente
 - Estudio de la fase
 - Órbita del eje
 - Diagrama de Bode
 - Diagrama Polar
 - Espectro frecuencial
 - Mapa espectral (Diagrama en cascada)
 - Diagramas de Evolución de Armónicos
 - Análisis Modal
 - Spike Energy (BCM, SEE, REBAM, SPM, D_{eff} , ...)

10.2. FUNDAMENTOS DE LAS VIBRACIONES MECÁNICAS

- Se puede definir la vibración como el movimiento alternante de un punto o superficie con respecto a una posición de referencia.



10.2. Fundamentos de las vibraciones mecánicas

- En cada instante de tiempo la vibración de un punto respecto a su posición de referencia puede ser descrita mediante tres magnitudes físicas:
 - Desplazamiento.
 - Velocidad.
 - Aceleración.
- Por ejemplo, supuesto que la oscilación fuese un movimiento armónico simple, la ecuación del desplazamiento, $x(t)$, sería:

$$x = X \cdot \cos(\omega t + \varphi)$$

Donde:

X = amplitud (desplazamiento máximo);

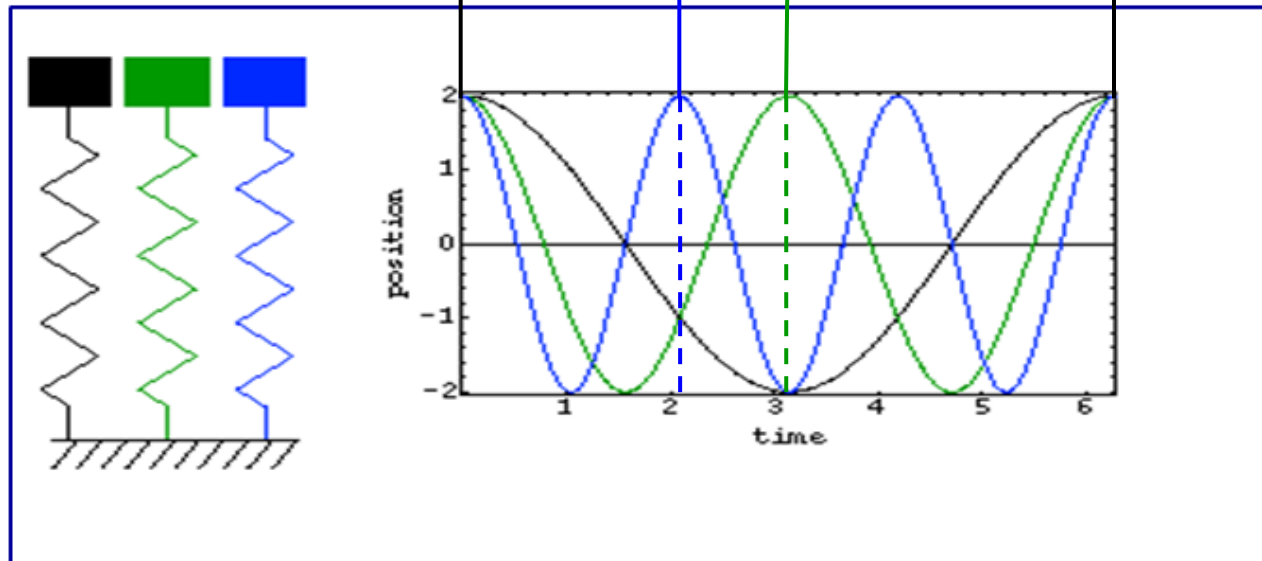
ω = frecuencia angular;

φ = fase (ángulo inicial)

10.2. Fundamentos de las vibraciones mecánicas

- En la figura pueden verse tres funciones armónicas de idéntica amplitud y fase, pero distinta frecuencia angular:

- $x_1 = X \cdot \cos \omega t$
- $x_2 = X \cdot \cos 2\omega t$
- $x_3 = X \cdot \cos 3\omega t$



10.2. Fundamentos de las vibraciones mecánicas

- Siguiendo con el ejemplo anterior, si la ecuación del desplazamiento es:

$$x = X \cdot \cos(\omega t + \varphi)$$

- La expresión de la velocidad será:

$$\dot{x} = -\omega \cdot X \cdot \sin(\omega t + \varphi)$$

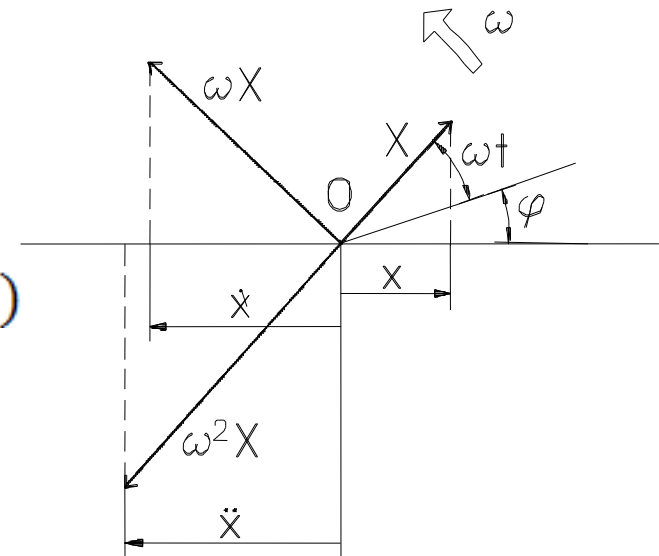
o lo que es igual: $\dot{x} = \omega \cdot X \cdot \cos(\omega t + \varphi + \pi/2)$

- La expresión de la aceleración será:

$$\ddot{x} = -\omega^2 \cdot X \cdot \cos(\omega t + \varphi)$$

o lo que es igual: $\ddot{x} = \omega^2 \cdot X \cdot \cos(\omega t + \varphi + \pi)$

- La representación vectorial de las tres magnitudes puede verse en el diagrama de la figura



10.2. Fundamentos de las vibraciones mecánicas

- ¿Qué sucede cuando se tienen simultáneamente componentes vibratorios de distintas frecuencias?
- Supongamos que el movimiento (desplazamiento) de la vibración fuese:

$$x = X_1 \cdot \cos(\omega_1 t + \varphi_1) + X_2 \cdot \cos(\omega_2 t + \varphi_2)$$

Y sea: $X_2 = 0,1 \cdot X_1$; $\omega_2 = 10 \cdot \omega_1$ y, por simplificar, $\omega_1 = 1$

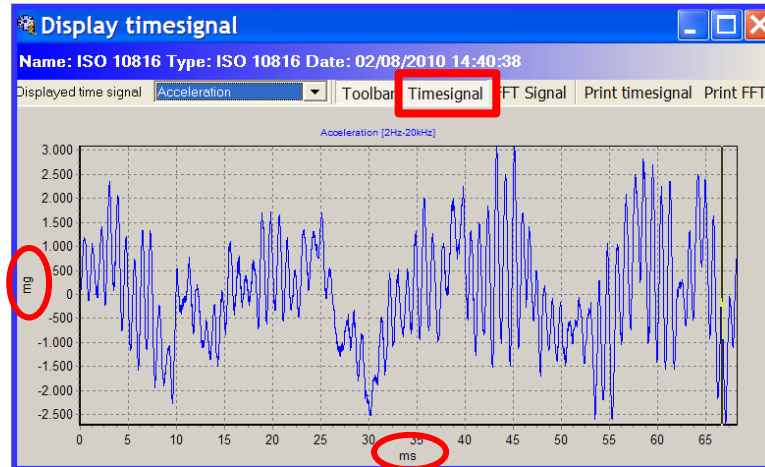
- El primer componente del desplazamiento tendrá una amplitud diez veces mayor que el segundo, y la amplitud total de la vibración tendrá un valor de aproximadamente $1,1X_1$.
- Si se mide la velocidad, el primer componente y el segundo tendrán la misma amplitud, y la amplitud de la vibración podrá alcanzar aproximadamente un valor máximo de $2X_1$.
- Si se mide en aceleración, el primer componente tendrá una amplitud diez veces menos que el segundo, y la amplitud total de la vibración podrá alcanzar aproximadamente un valor máximo de $11X_1$.

10.2. Fundamentos de las vibraciones mecánicas

Aunque las tres magnitudes miden la vibración, cada una de ellas se utiliza para estudiar bandas frecuenciales diferentes:

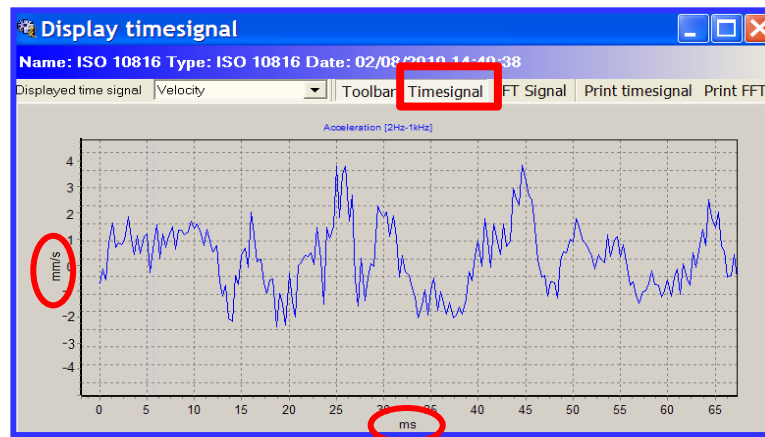
- La **aceleración** (mm/s^2 o $g's$) se utiliza para analizar vibraciones de alta frecuencia:
Defectos en rodamientos, engranajes, turbulencias, cavitación, etc.
- El **desplazamiento** (μm) se utiliza principalmente para detectar defectos relacionados con la dinámica de la rotación:
Desequilibrio, desalineación, roces, frecuencias resonantes, etc.
- La **velocidad** se utiliza con carácter general en todo el ancho de banda de la vibración, es decir, cuando se pretende tener una visión general del estado de la máquina. Por ello, la mayor parte de las normativas miden el nivel de vibración (*Severidad* de la vibración) en unidades de velocidad (mm/s).

10.2. Fundamentos de las vibraciones mecánicas



Señales de aceleración y velocidad de una misma vibración.

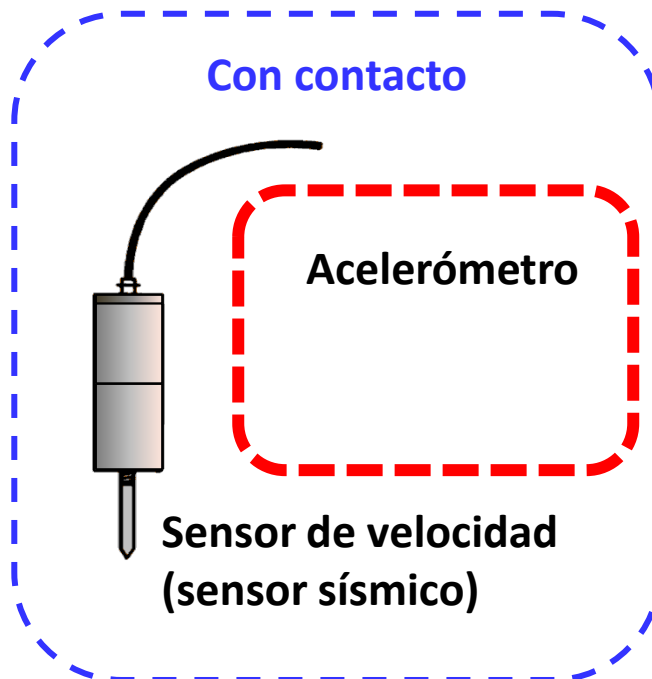
ACELERACIÓN



VELOCIDAD

10.3. SENSORES PARA LA MEDIDA DE LA VIBRACIÓN

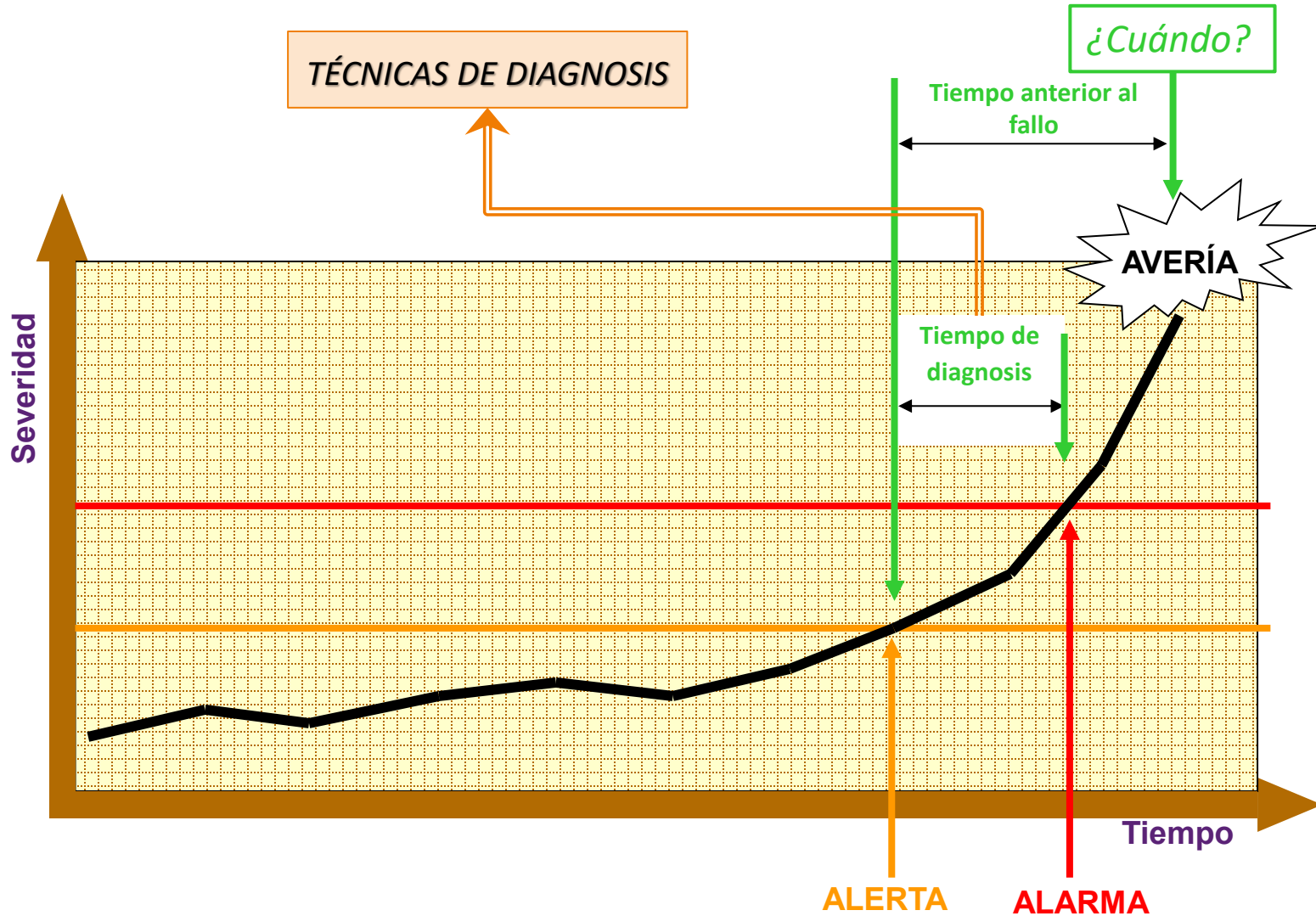
- Existen sensores que miden directamente cada una de las magnitudes en las que se puede medir la vibración: desplazamiento, velocidad y aceleración.
- Mediante los circuitos electrónicos adecuados (o mediante software) a partir de una cualquiera de las magnitudes pueden **calcularse** las otras dos.



10.4. LA MEDIDA DEL NIVEL DE SEVERIDAD DE LA VIBRACIÓN

- Para analizar el estado funcional de una máquina mediante las vibraciones debe tenerse en cuenta lo siguiente:
- En toda máquina, su correcto estado de operación produce cierto nivel de vibraciones que puede considerarse como su "*estado base*", que constituye la referencia básica para su posterior seguimiento y análisis.
- La aparición de un defecto en la máquina, incluso en fase incipiente, lleva asociados ciertos cambios en su vibración:
 - Normalmente se produce un aumento en el nivel, lo que permite detectar el problema.
 - Cambios específicos en las características frecuenciales de la vibración. El análisis de estos cambios permite identificar el problema.

10.4. La medida del nivel de severidad de la vibración



10.4. La medida del nivel de severidad de la vibración

Para analizar el estado de la máquina es necesario, por tanto, conocer su estado base y, consecuentemente, disponer de un valor de referencia del nivel de vibración que sea representativo de una condición funcional correcta.

Conocido este nivel de referencia, se deben fijar dos valores:

- Un **nivel de alerta**, indicativo de un estado anormal y, por consiguiente, de la probable presencia de un defecto funcional.
- Un **nivel de alarma** que, además de confirmar la existencia del problema funcional, represente por sí mismo un valor de vibración peligroso para el funcionamiento de la máquina.

Existen diferentes criterios orientativos y normativas que fijan estos 2 valores dependiendo del tipo de máquina y de su régimen. La norma más usada para determinar el nivel de severidad de la vibración es la **ISO 20816** que se estudiará más adelante.

10.4. La medida del nivel de severidad de la vibración

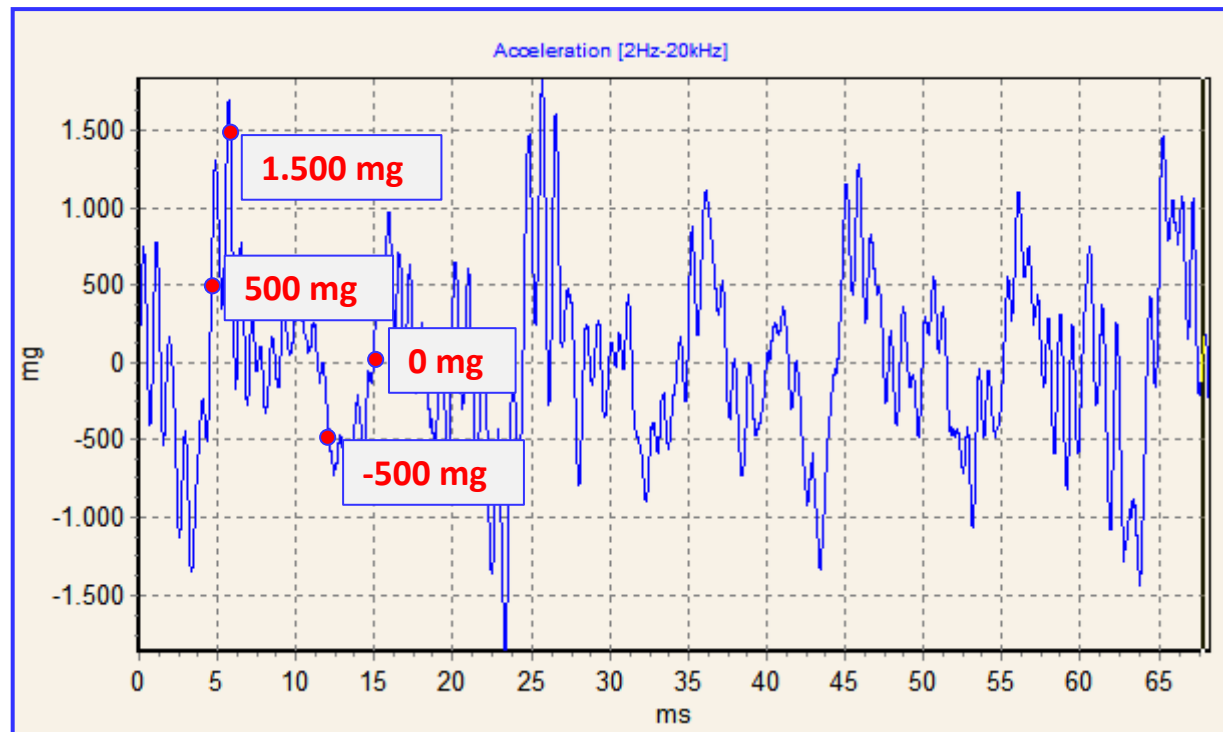
Los valores más utilizados para la medida de la vibración son:

- **Valor pico a pico** (*peak to peak value*).- Indica el recorrido máximo de la vibración. Por ejemplo, si se estudia el desplazamiento, indica la máxima excursión realizada por el punto considerado.
- **Valor de pico** (*peak value*).- Es el valor máximo de la señal rectificada, durante el período de tiempo de adquisición.
- **Valor global de pico o Valor de pico medio** (*global peak value*).- Es el valor medio de los sucesivos valores de pico producidos en la señal rectificada, durante el período de tiempo de adquisición. Es un indicador de la media de los picos de la señal, y se trata de un valor que suelen dar la mayoría de los instrumentos de medida de vibraciones.
- **Valor medio** (*average value*).- Es el valor medio de la señal rectificada.
- **Valor eficaz o valor RMS** (*RMS value*).- Se calcula como la raíz cuadrada de la media cuadrática de la señal.

10.4. La medida del nivel de severidad de la vibración

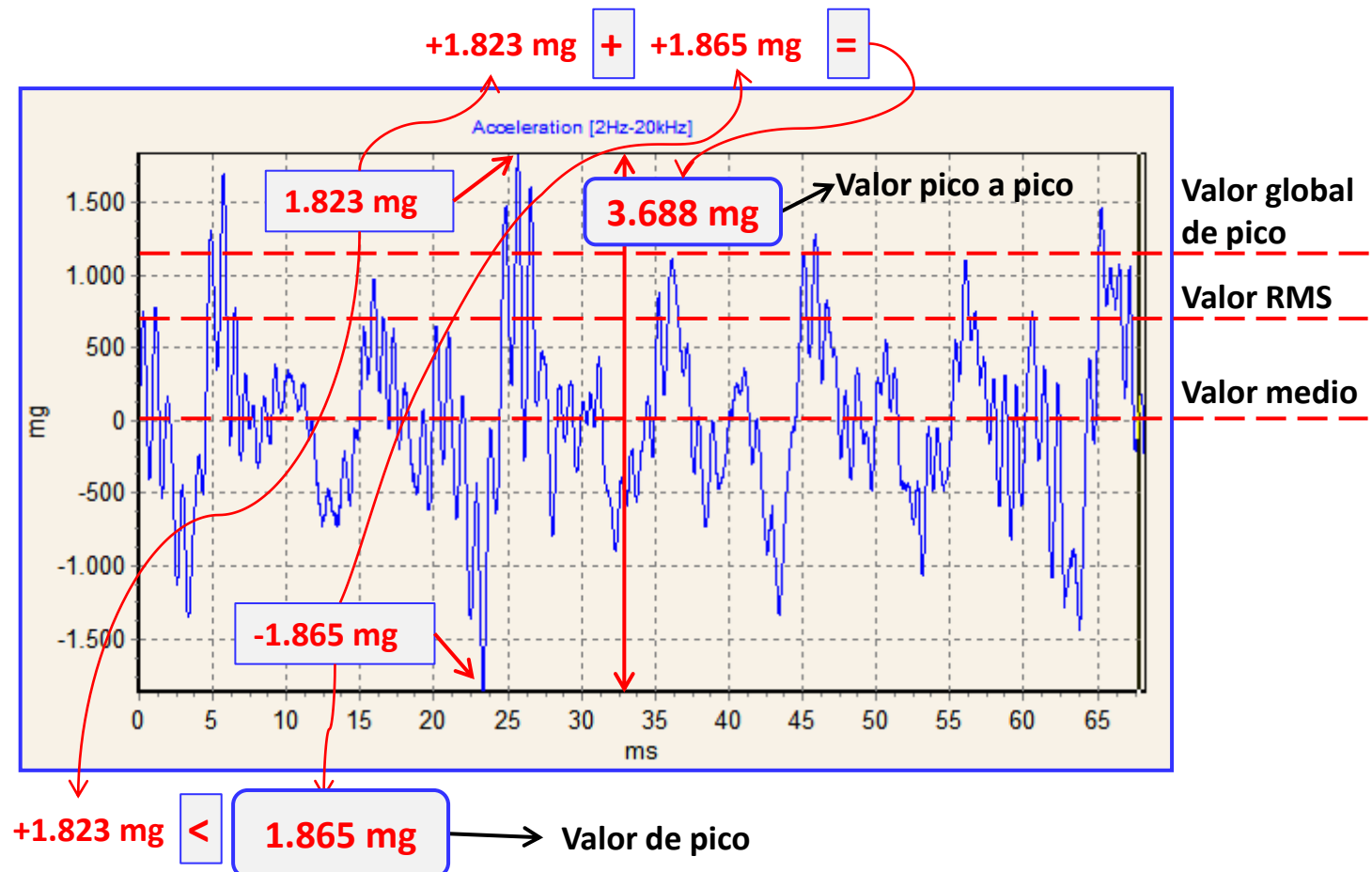
Valores característicos de la señal temporal de vibración:

Diferentes valores instantáneos, $v(t)$



10.4. La medida del nivel de severidad de la vibración

Valores característicos de la señal temporal de vibración:



10.4. La medida del nivel de severidad de la vibración

En general, las normativas sobre severidad de la vibración están referidas al valor RMS, especialmente cuando se dan en unidades de velocidad (mm/s). Esto es debido principalmente a dos razones:

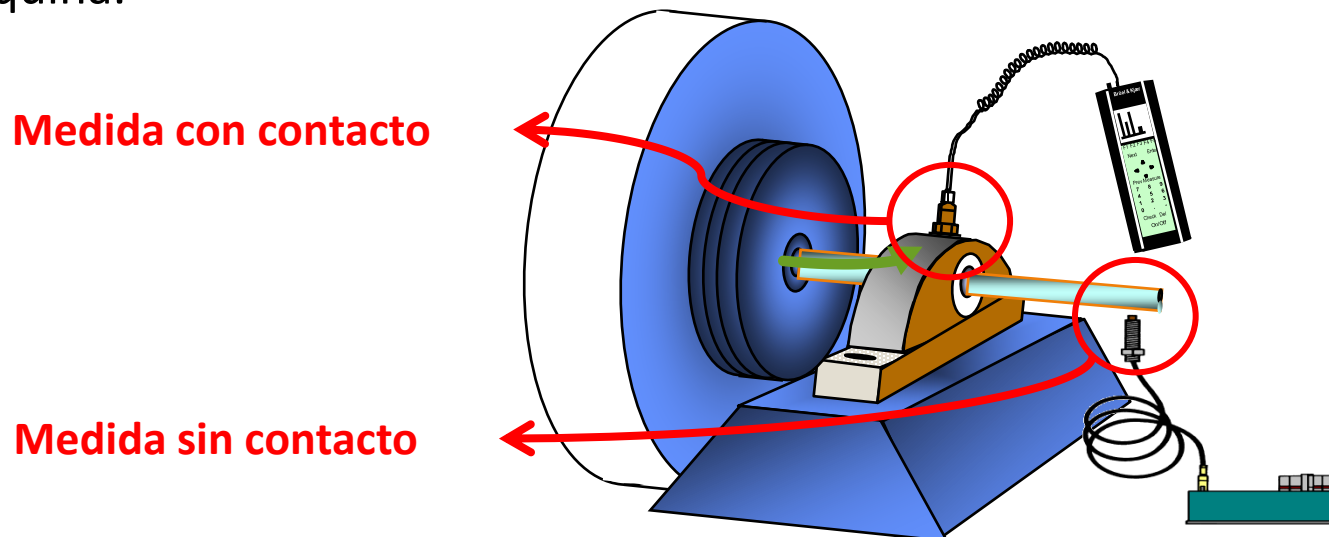
- Para una misma señal, es un valor más estable que el valor de pico y, por tanto, más representativo.
- Su cuadrado es proporcional a la energía disipada por la vibración, por lo que es un indicador de las pérdidas y del desgaste por fatiga de los materiales.

No obstante, en muchos casos, conocer también los valores de pico puede ser de gran utilidad para discriminar el tipo o el origen del defecto de la máquina, tales como roces o daños puntuales en rodamientos, indentaciones en transmisiones de engranajes, etc.

A veces se utiliza como dato de diagnóstico el cociente o algún tipo de relación entre estos dos valores, un especie de *curtosis* de la señal o un *factor de cresta*.

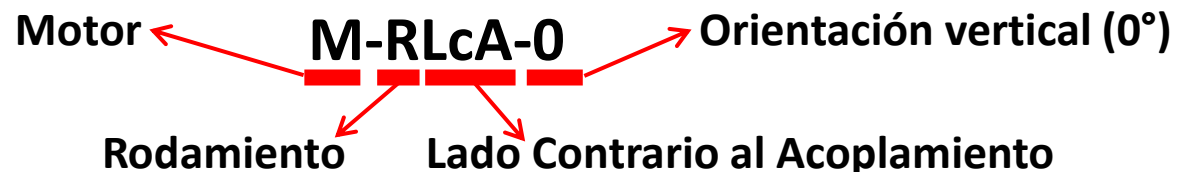
10.4. La medida del nivel de severidad de la vibración

- Los efectos dinámicos de la máquina provienen de las partes móviles. En un EDR las fuerzas que provoca la vibración se originan en los elementos rotóricos.
- Las medidas de vibración se realizan colocando los sensores en las zonas más próximas al origen de la vibración, como son los soportes de los cojinetes o midiendo directamente el desplazamiento del eje de la máquina.



10.4. La medida del nivel de severidad de la vibración

- Cada punto de medida tiene una designación propia en su equipo de modo que permita su localización de forma inequívoca.
- El código elegido para realizar la designación de los puntos de medida debe ser único y poder interpretarse con facilidad.
- Lo más frecuente es utilizar un código en el que se indique la máquina, la posición dentro de ésta (referido a algún componente característico de la misma) y la orientación.
- Los rodamientos y el acoplamiento entre máquinas son las referencias más comunes en la máquina.
- Así, en un equipo compuesto por un motor eléctrico acoplado a una bomba centrífuga, un punto de medida podría ser el siguiente:

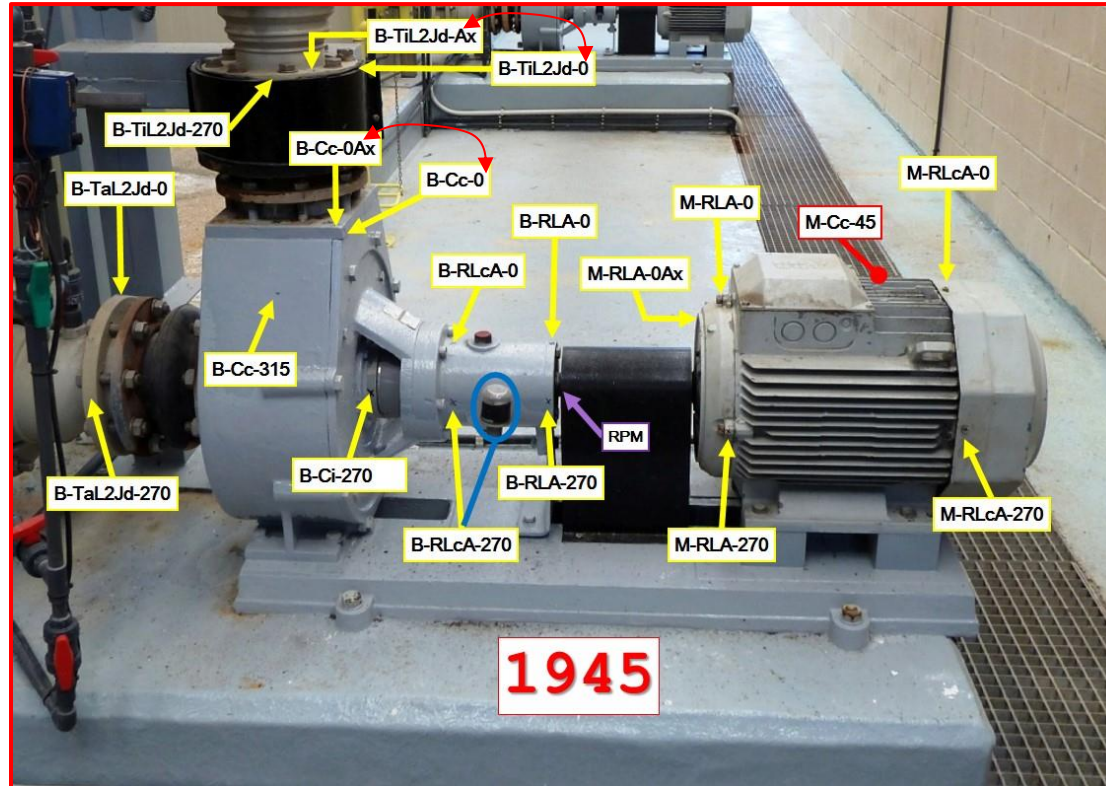
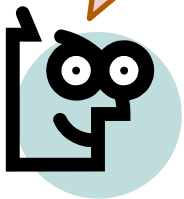


10.4. La medida del nivel de severidad de la vibración

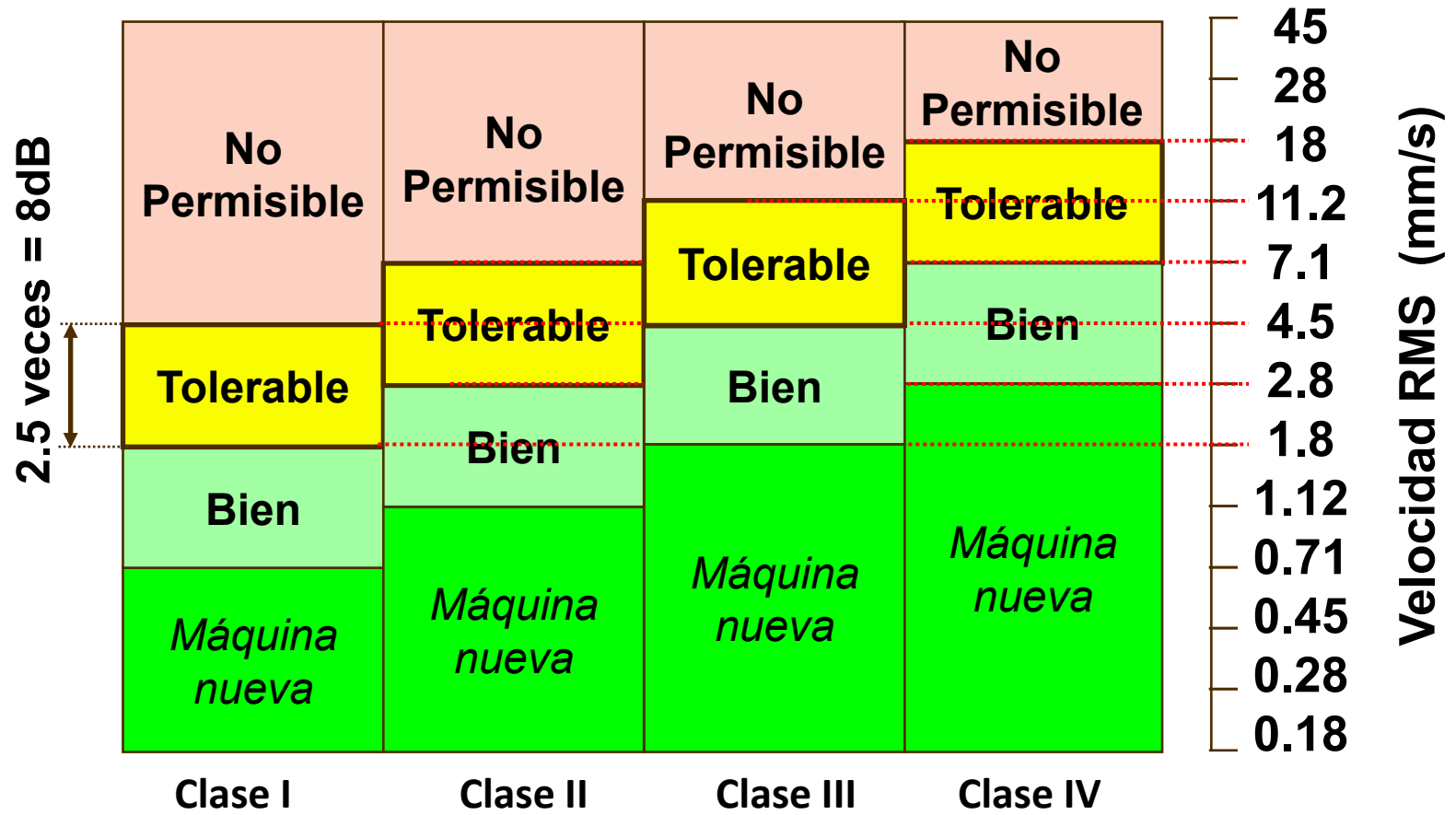
El formato del código para designar la localización exacta de cada punto de medida en el equipo es:

[máquina]-[elemento referencial][situación relativa]-[orientación]

Encuentra
el error



10.5. LA NORMA ISO 20816



10.5. La Norma ISO 20816

Donde cada clase se corresponde con un tipo de máquina:

- **Clase I.** Componentes de motores y máquinas de poca potencia (hasta 15 kW) unidos rígidamente al equipo completo.
- **Clase II.** Máquinas de potencia comprendida entre 15 kW y 75 kW sin cimentación especial. Motores y máquinas de hasta 300 kW colocados rígidamente en cimientos especiales.
- **Clase III.** Máquinas motrices grandes y otras máquinas grandes con masas giratorias colocadas sobre cimientos rígidos y pesados que tienen una relativa rigidez en la dirección de la vibración medida.
- **Clase IV.** Máquinas motrices grandes y otras máquinas grandes con masas giratorias colocadas sobre cimientos relativamente flexibles en la dirección de la vibración (por ejemplo: turboalternadores y turbinas de gas con una potencia superior a 10 MW).

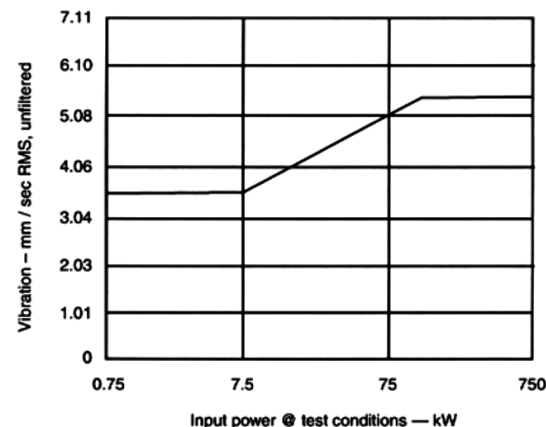
Obsérvese que esta norma no tiene en cuenta la velocidad de giro.

10.5. La Norma ISO 20816

Otras normas pueden organizarse en los dos grupos siguientes:

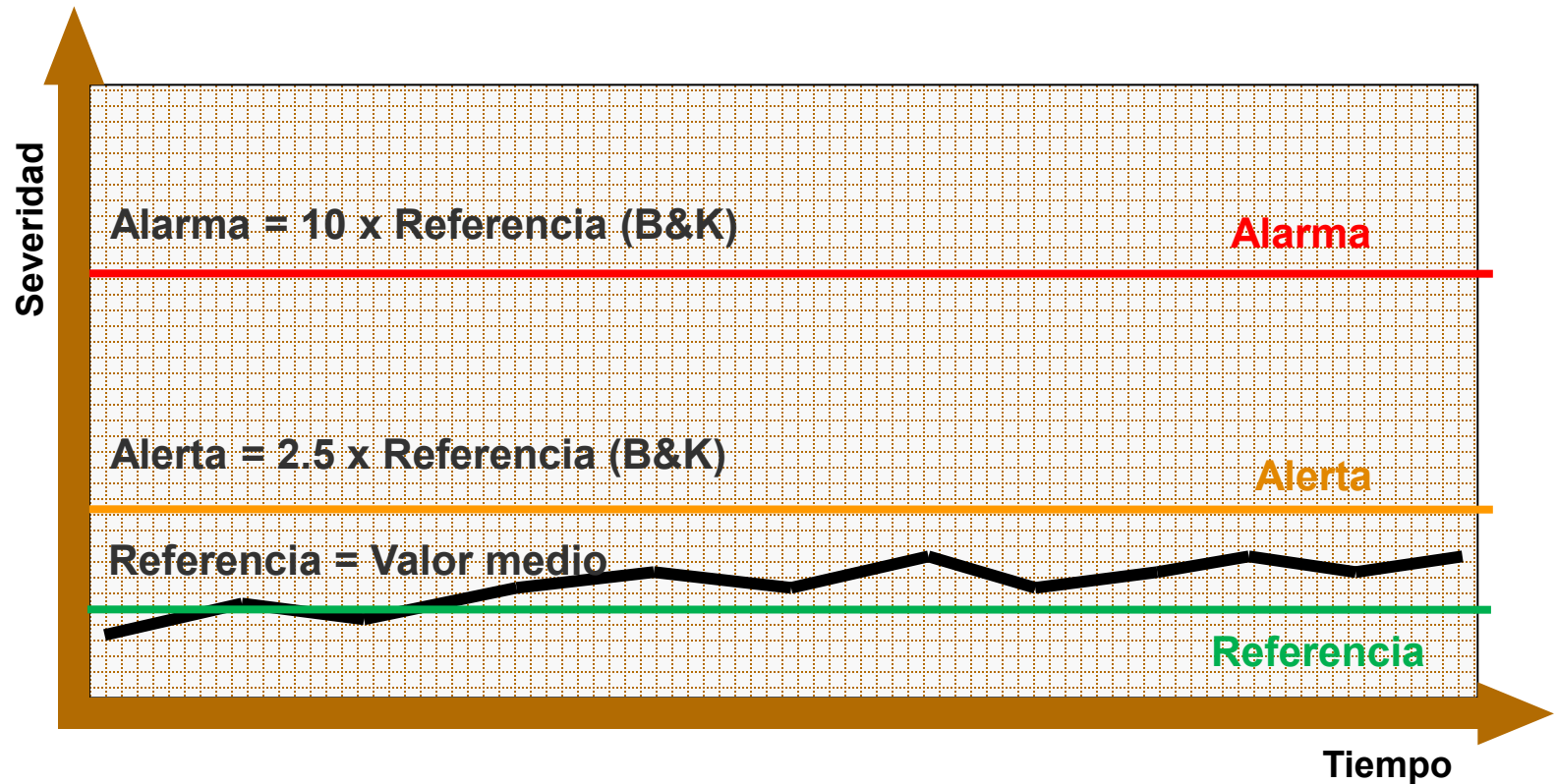
- i) **Normativas para todo tipo de maquinaria.** Son aplicables a todo tipo de máquinas, tales como: Norma ISO 3945, Norma ISO 2372, Carta de T.C.RATHBONE, recomendaciones de fabricantes, etc.
- ii) **Normativas para tipos determinados de máquinas.** Se refieren a algún tipo de máquina o equipo concreto (motores eléctricos, bombas, compresores, etc.). Algunos ejemplos son: Especificación del Gobierno Canadiense CDA/MS/NVSH 107, Carta H.P.BLAKE, Norma AGMA, Normas API 611/612/616/617, referencias de fabricantes, etc.

Valor límite de vibración
recomendado por un
fabricante de bombas
centrífugas



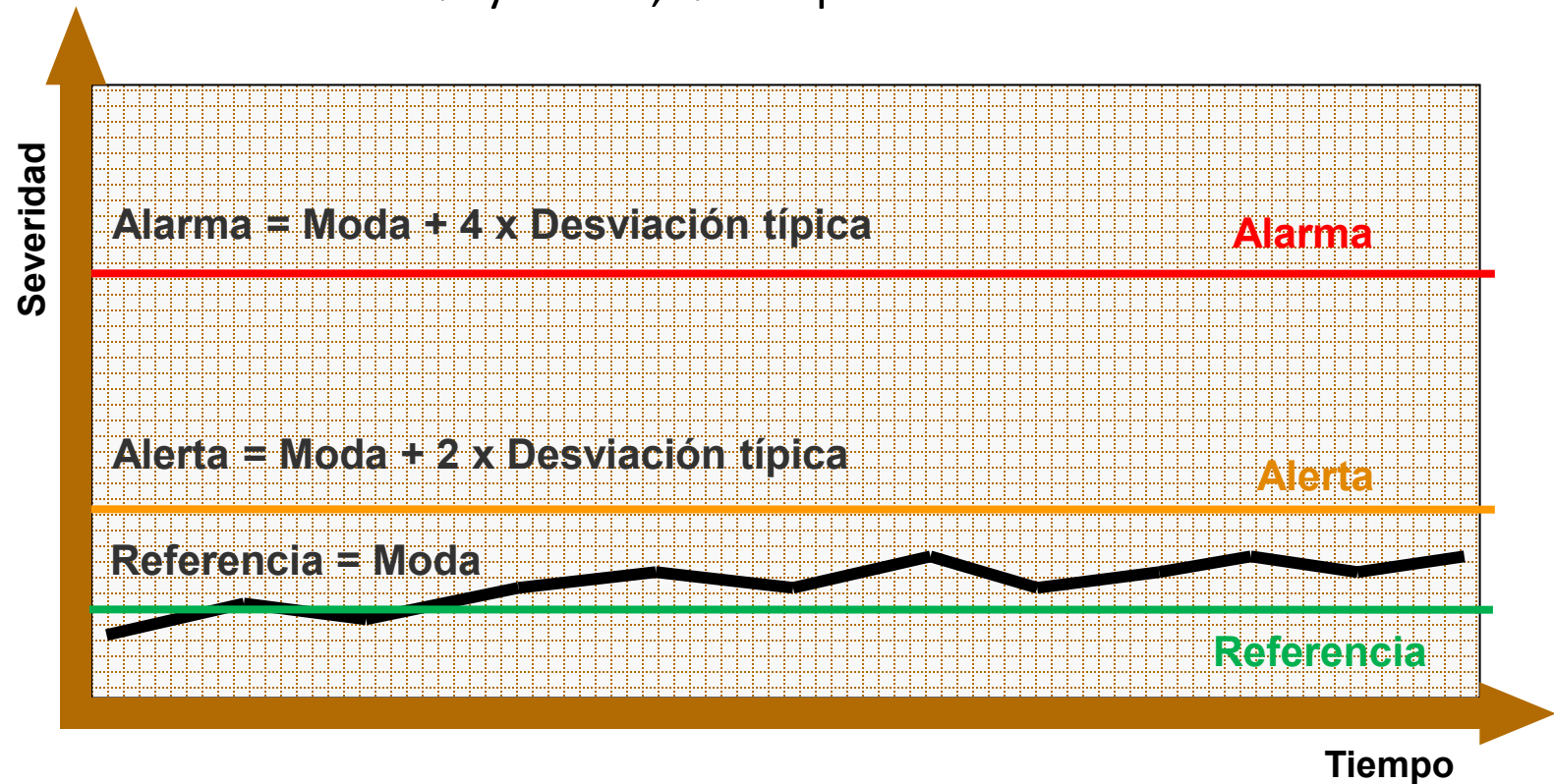
10.5. La Norma ISO 20816

Los valores de alerta y alarma de cada máquina deberían ir ajustándose conforme se vaya conociendo mejor sus propias características funcionales.



10.5. La Norma ISO 20816

Cuando se toma como referencia la distribución de probabilidad de Rayleigh, los valores de alerta y alarma indicados arrojan una probabilidad de defecto funcional del 91% y del 99,5% respectivamente.



10.5. La Norma ISO 20816

Como se ha visto, el estado del equipo puede estimarse con niveles de alerta y alarma fijados en normativas, como la ISO 20816, u otro estándar o referencia.

No obstante, se puede demostrar que la distribución de probabilidad de los valores del nivel de vibración de un equipo dinámico rotativo (EDR) se ajusta bien a la función de distribución de Rayleigh (ver figura).

En tal caso, el valor de la moda de la vibración, m , es la referencia básica para determinar el estado del equipo estableciendo los siguientes niveles:

- Alerta: $m + 2\sigma$
- Alarma: $m + 4\sigma$

siendo σ la desviación típica de la distribución:

$$\sigma = m \sqrt{2 - \frac{\pi}{2}}; \mu = m \sqrt{\frac{\pi}{2}}$$

Donde μ es la media de la distribución.

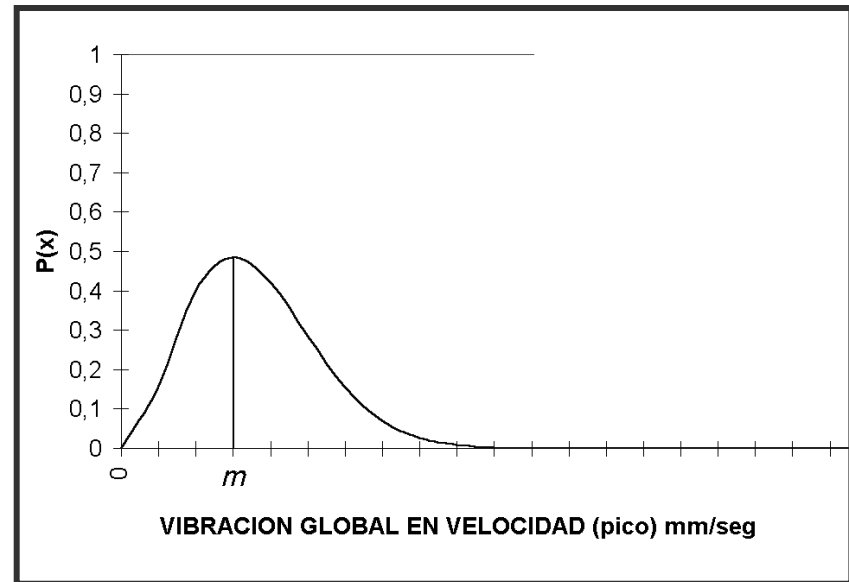


Figura. Función de densidad de probabilidad de Rayleigh.

10.6. TÉCNICAS PARA EL ANÁLISIS DE LA VIBRACIÓN

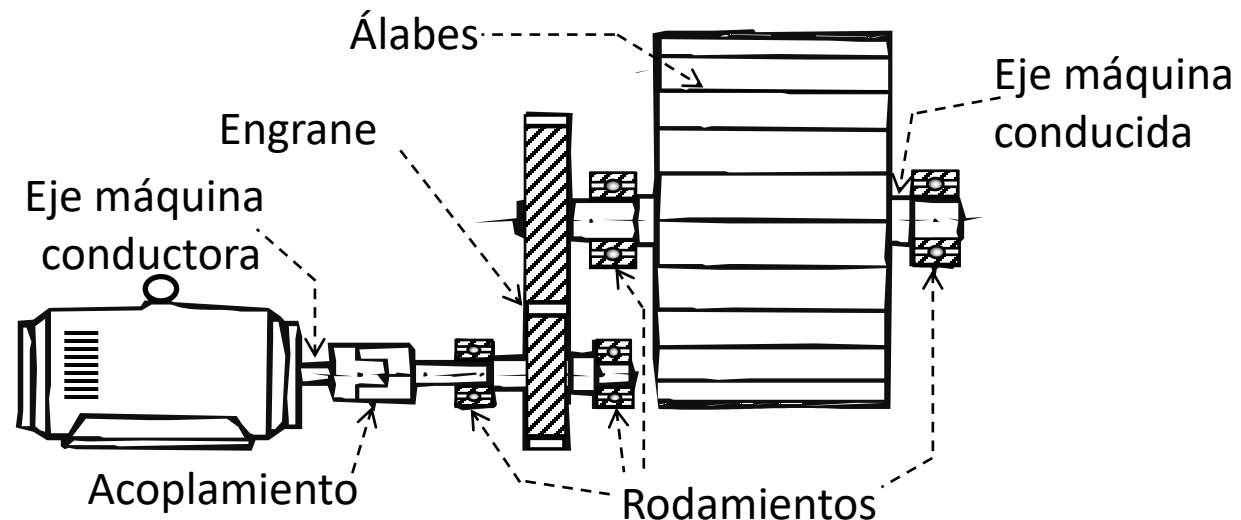
- Seguidamente se exponen resumidamente algunas técnicas para el análisis de la vibración.
- Dependiendo del tipo de máquina, de la instrumentación disponible, del elemento estudiar y de la sensorización instalada podrá utilizarse una u otra.
- Si bien en todas ellas se analiza la vibración, cada técnica permite estudiar una faceta distinta de la misma.
- Del mismo modo que si de las diferentes caras de un cubo se tratase, cada técnica permite observar detalles que con otras no es posible.
- Cuando el diagnóstico no es evidente con una de ellas, generalmente mediante el espectro, utilizar alguna de las técnicas que se exponen seguidamente puede ayudar a concretar un diagnóstico diferencial.

10.6.1. El espectro de frecuencias

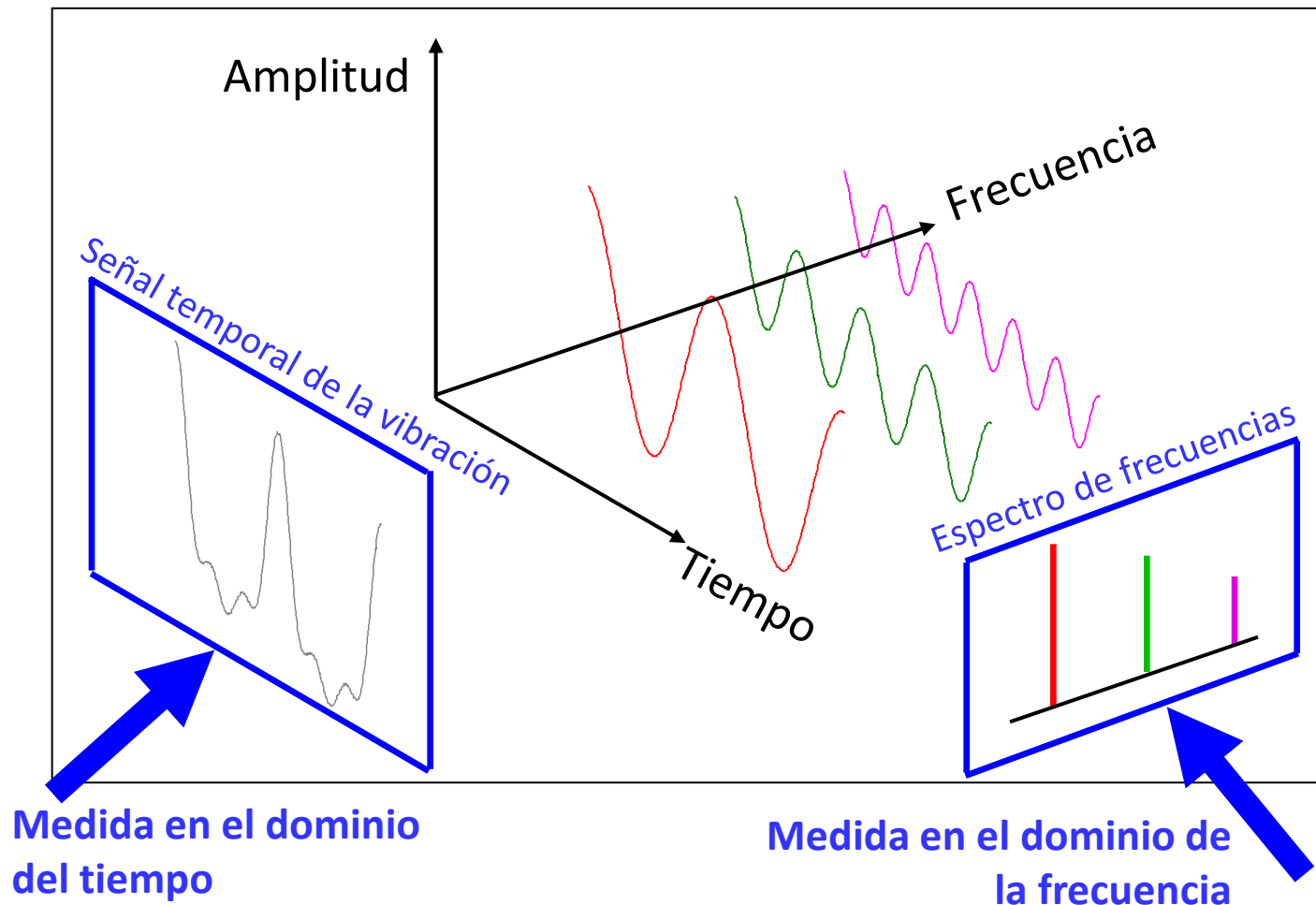
- ☐ En los equipos dinámicos la vibración es producida por las partes móviles del equipo. Por lo tanto, es de esperar que guarde alguna relación con el movimiento del elemento que la origina.
- ☐ En un Equipo Dinámico Rotativo (*EDR*), la velocidad de giro de cada uno de sus componentes constituye una fuente de vibración que se transmite, en cierta medida, a lo largo de todo el equipo.
- ☐ Además, se producen impactos que originan vibraciones resonantes en distintos elementos del equipo (eje, bastidor, álabes, etc.) o conectados al mismo (tuberías, estructuras, elementos próximos, etc.).
- ☐ Por otra parte, el rozamiento o la rodadura entre partes del equipo con velocidad relativa entre sí son fuente de vibraciones aleatorias, fluctuaciones en el régimen de giro o impactos. Tal es el caso de los rodamientos, cojinetes de deslizamiento, álabes, ventiladores, cierres, etc.

10.6.1. El espectro de frecuencias

- En la vibración de un equipo coexisten componentes vibratorios de carácter periódico producidos por las partes móviles del equipo, unas veces de tipo armónico y otras no, y componentes de carácter aleatorio, causados por la fricción, impactos, transitorios de carga, etc.
- Conocida la frecuencia del movimiento (por ejemplo de giro) de cada elemento del equipo será posible asociarlo con su componente vibratorio.

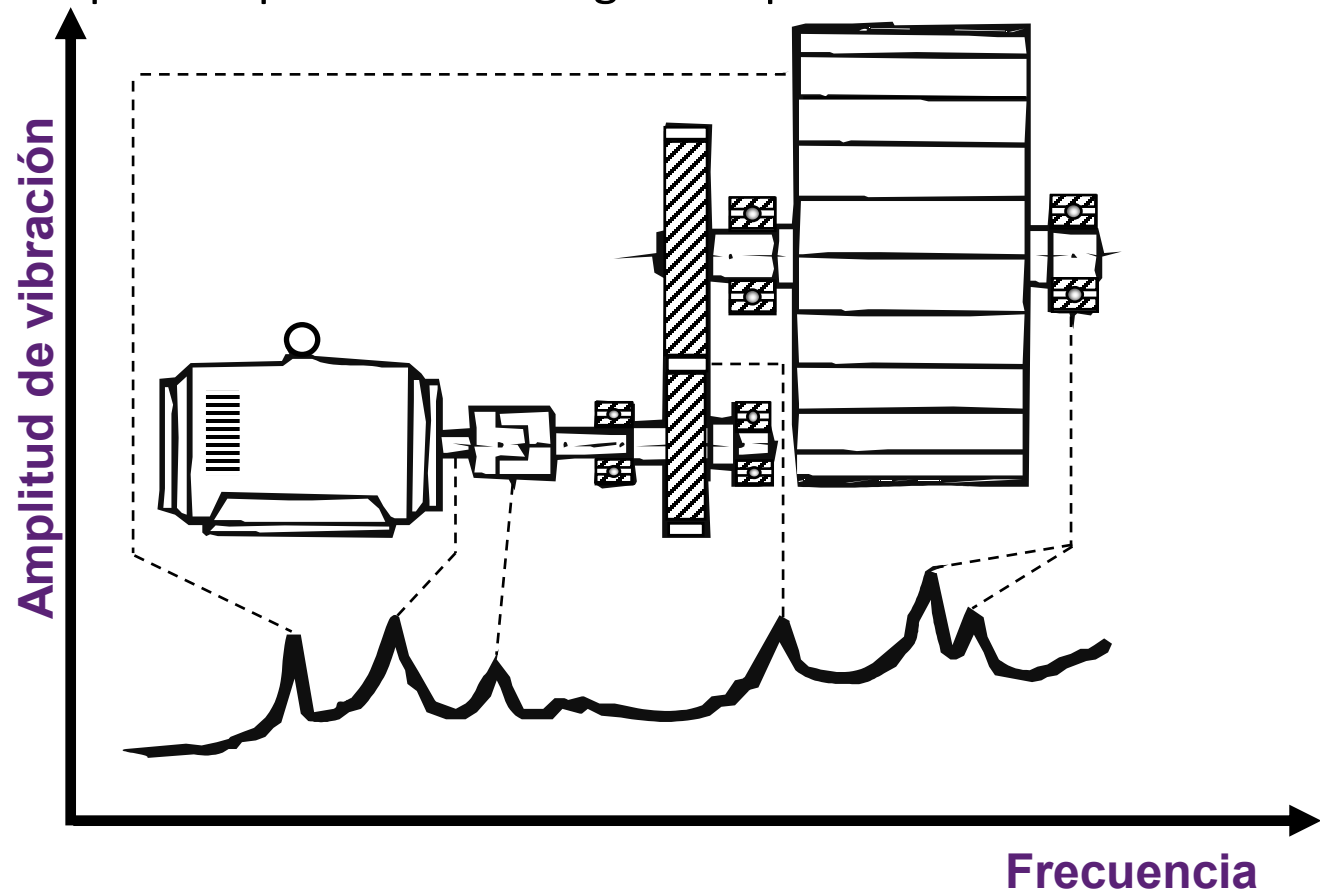


10.6.1. El espectro de frecuencias



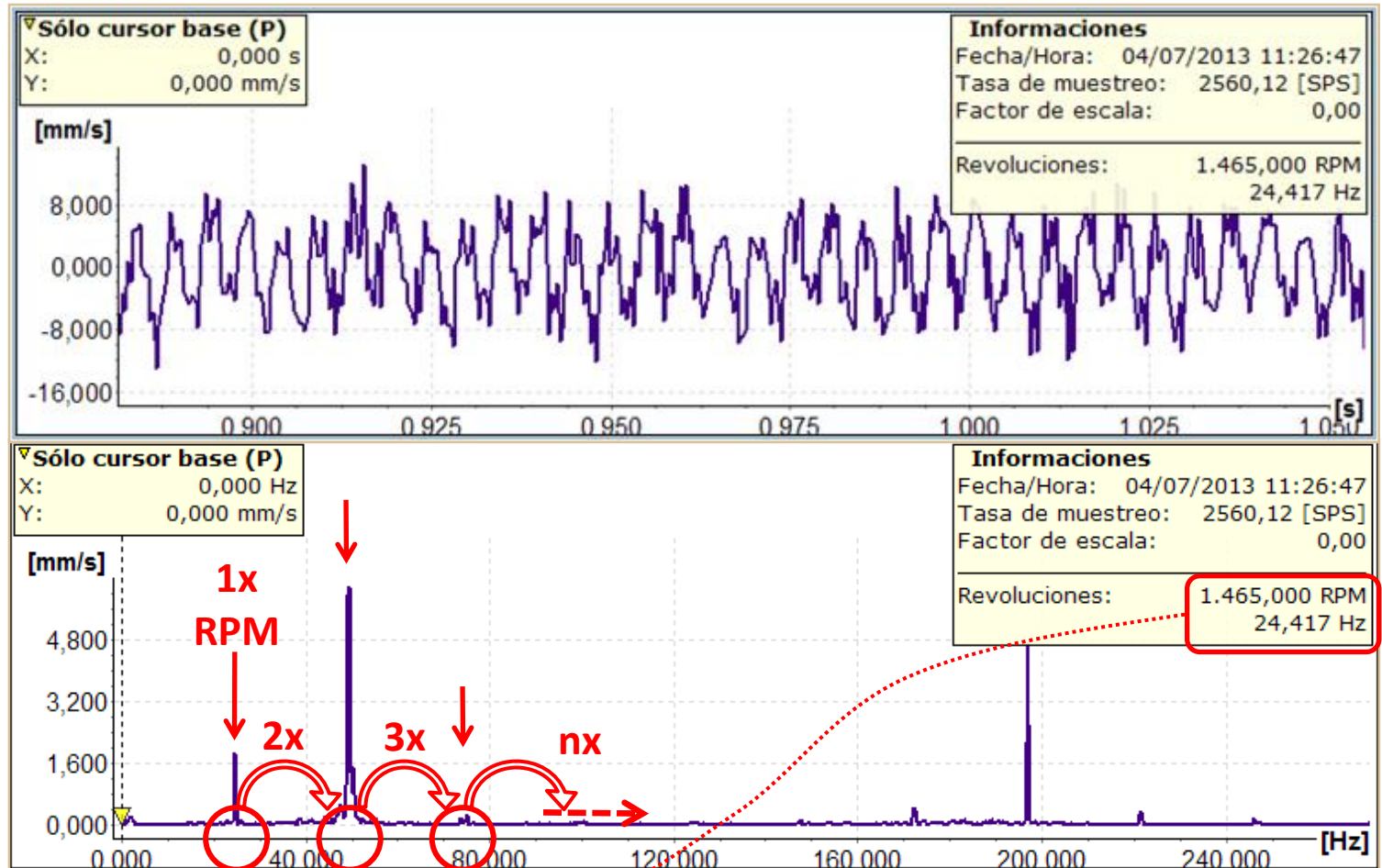
10.6.1. El espectro de frecuencias

Cuando se desarrolla un problema mecánico, aparece un pico frecuencial asociado al espectro que delata el origen del problema.



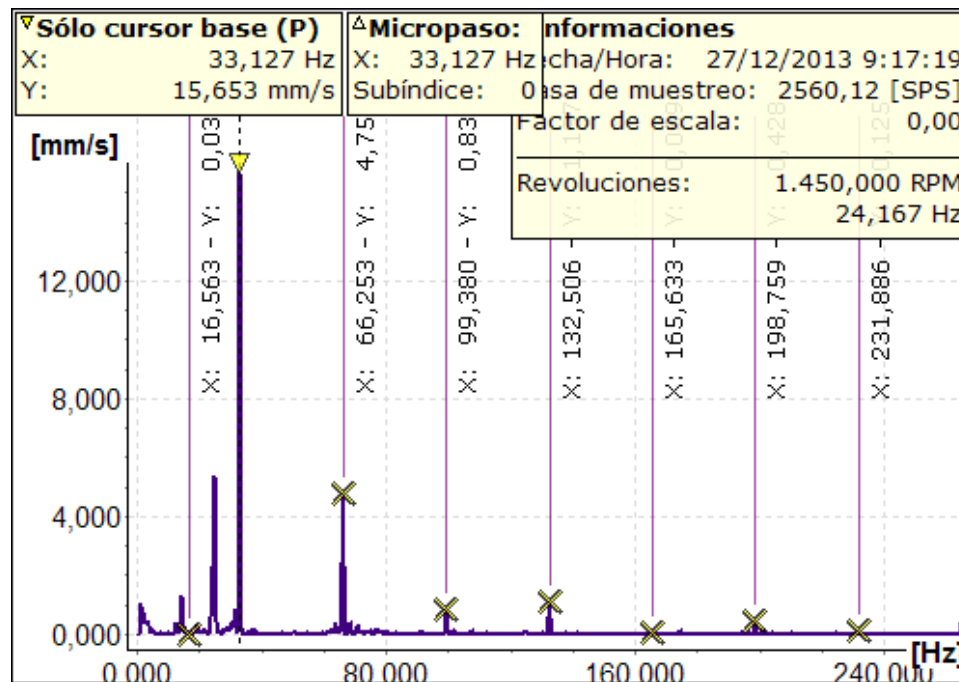
10.6.1. El espectro de frecuencias

Señal temporal y espectro en el punto B-RLcA-0 del equipo 1945 (04/07/2013)

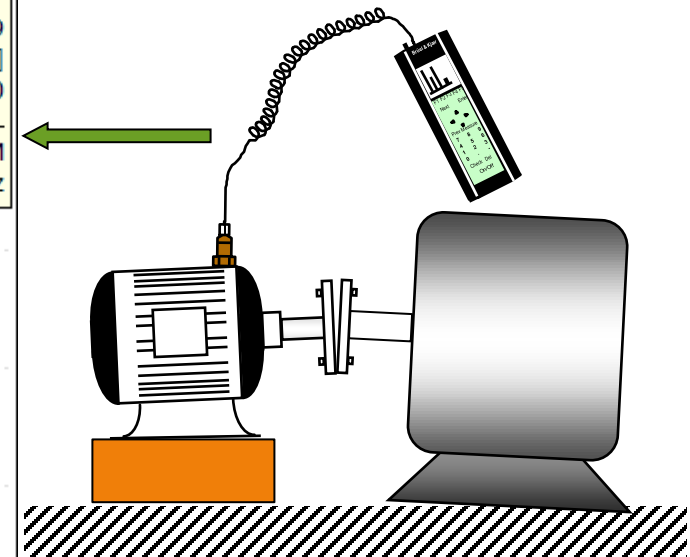


10.6.1. El espectro de frecuencias

- El punto de partida del diagnóstico es el registro de la señal temporal, pero es preciso definir la magnitud, el ancho de banda y las frecuencias de corte, la duración del registro, el número de componentes espectrales, etc.

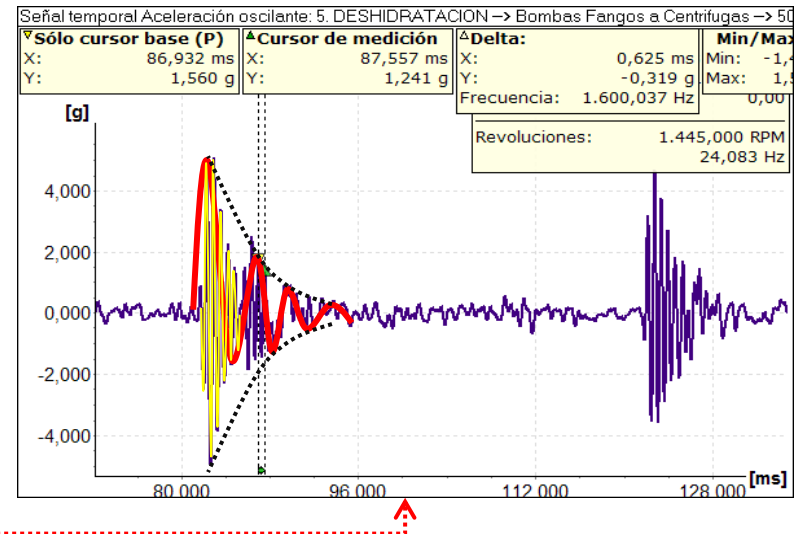
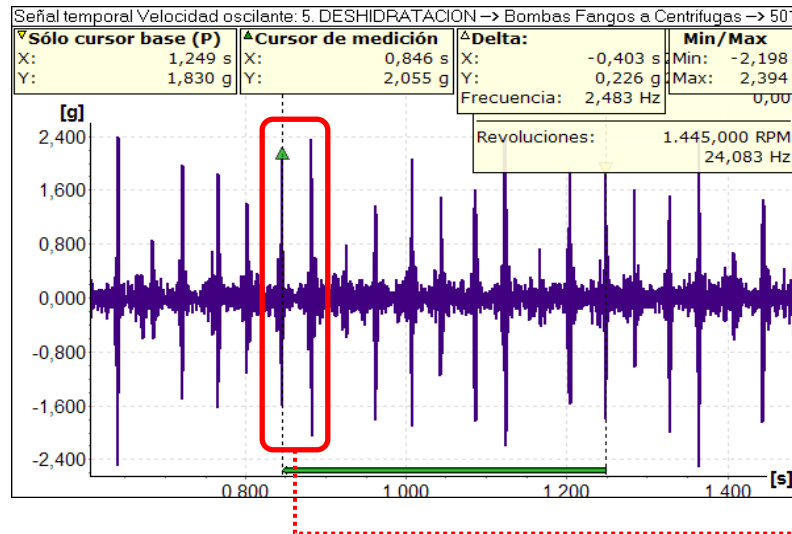


Espectro de vibración en el punto M-RLA-0



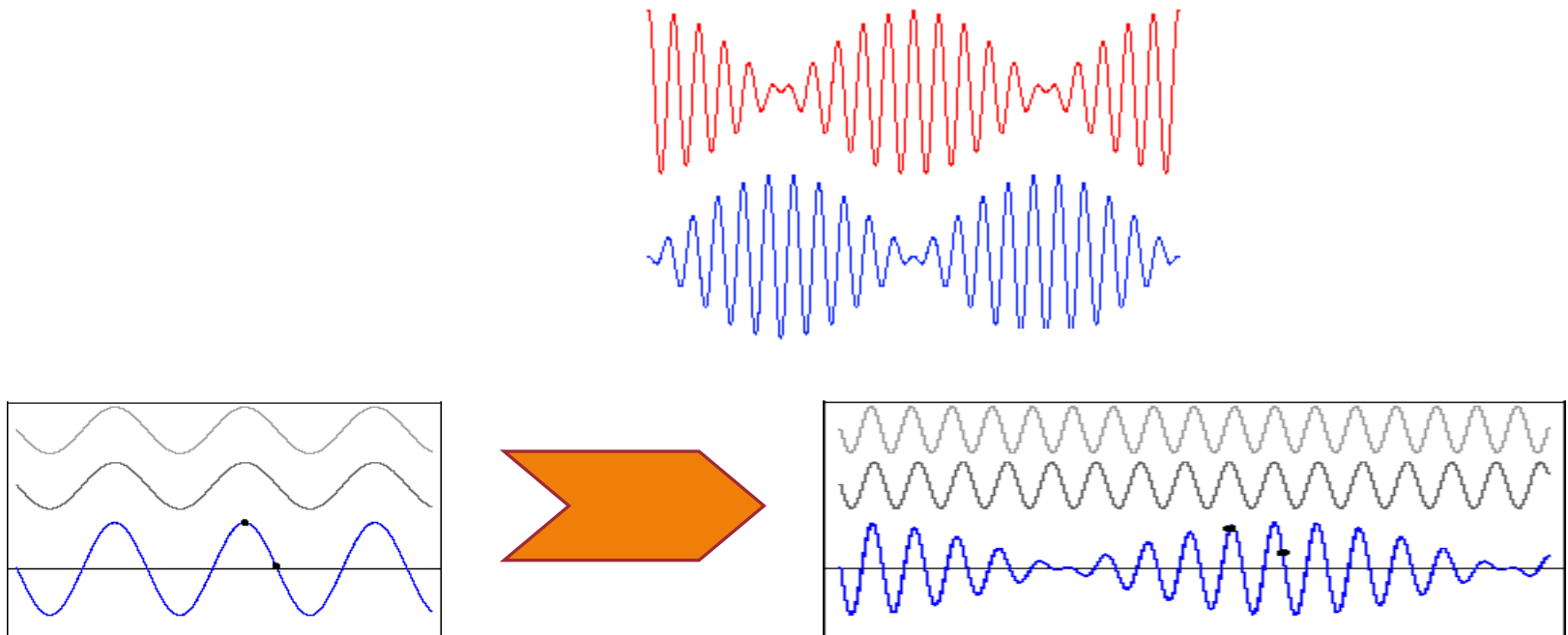
10.6.2. Forma de la onda

- Los defectos que mejor pueden detectarse mediante esta técnica son aquellos que producen algún tipo de deformación característica de la onda, como son los roces del eje, impactos periódicos, solturas, etc.
 - Puede visualizarse en la pantalla de un osciloscopio o de un instrumento analizador adecuado.
 - Se realiza sobre la onda del desplazamiento.



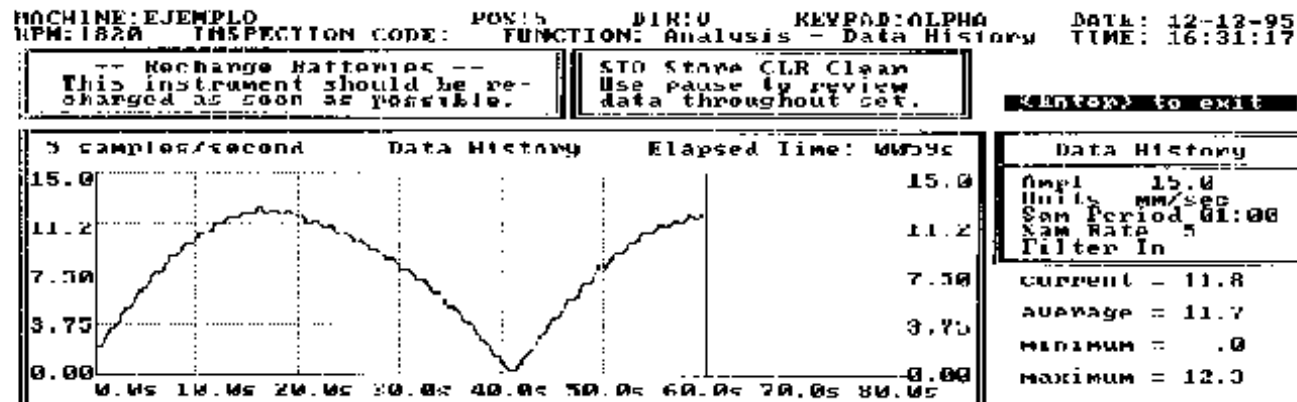
10.6.2. Forma de la onda

- En la figura puede observarse el efecto de dos sistemas (máquinas) vibrando a frecuencias distintas pero conectadas mecánicamente (por ejemplo, mediante el bastidor o una tubería común) .

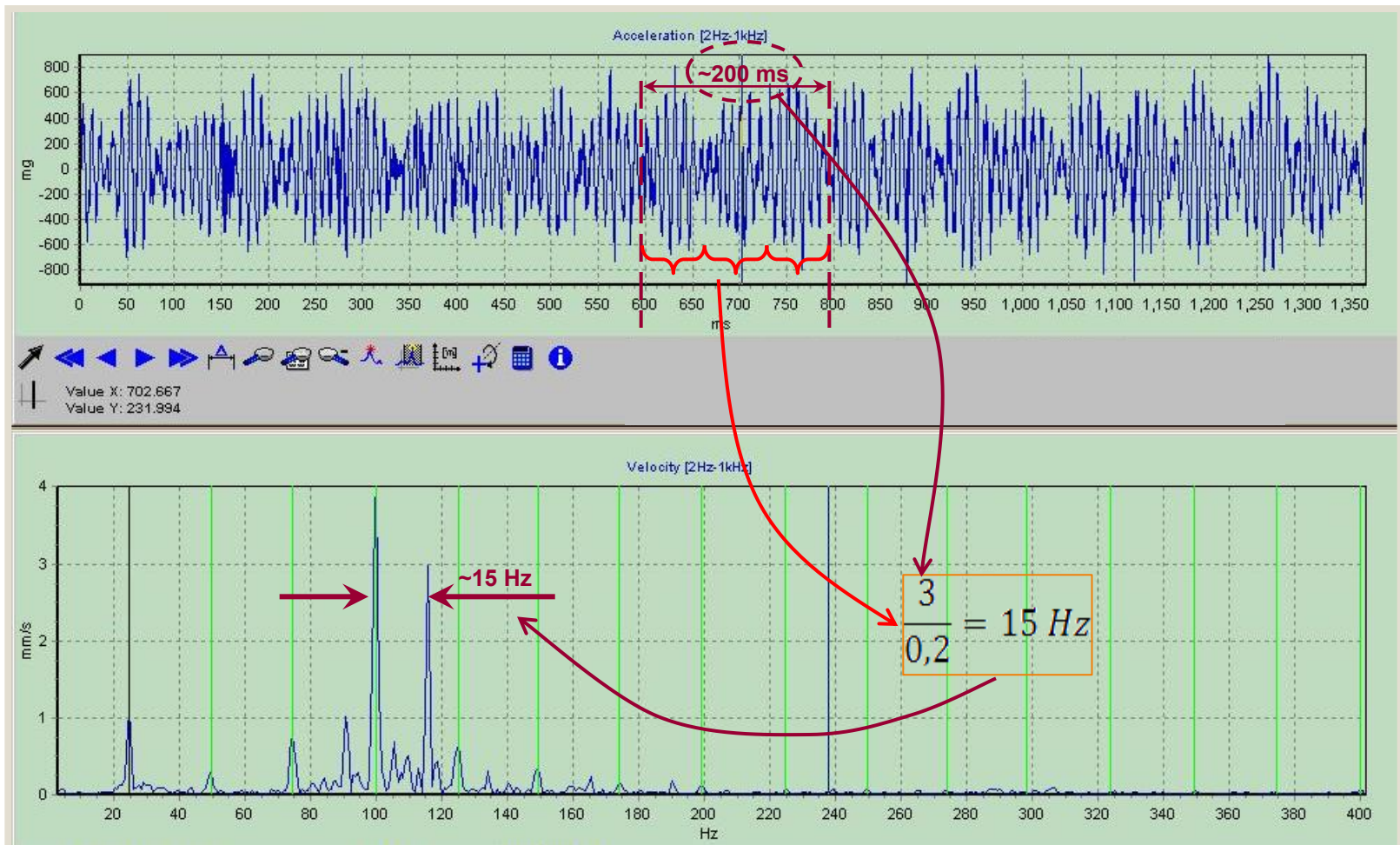


10.6.3. Envolvente de la onda

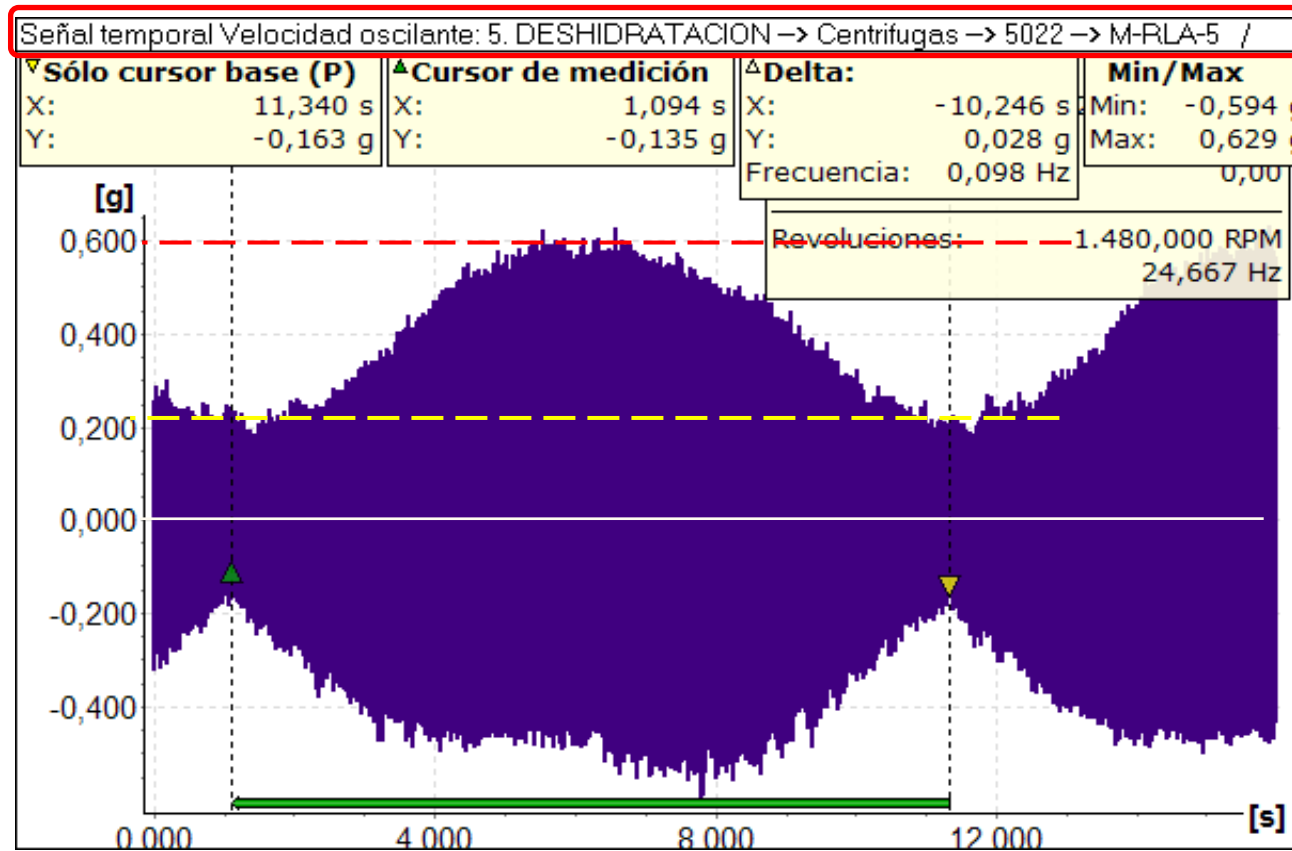
- Se visualiza mediante un osciloscopio o un instrumento analizador adecuado.
- Se puede obtener sobre la onda de desplazamiento o de velocidad.
- La envolvente superior de la onda de desplazamiento puede delatar modulaciones como consecuencia de vibraciones "acopladas".
- También puede obtenerse representando la evolución en el tiempo de la señal de nivel global, ya sea referido al valor de pico o al RMS.



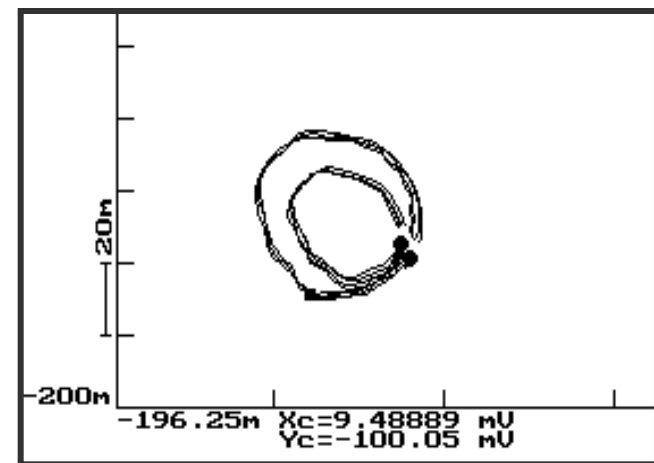
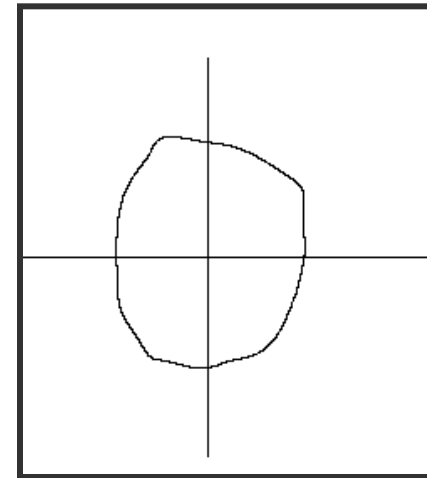
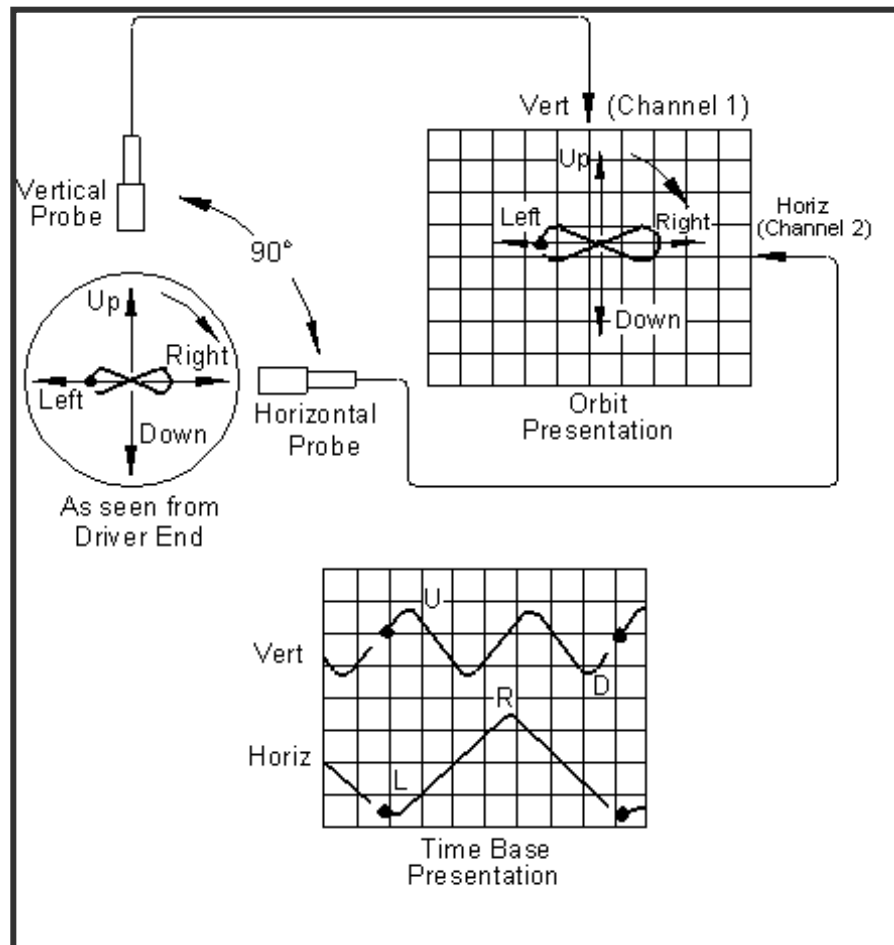
10.6.3. Envolvente de la onda



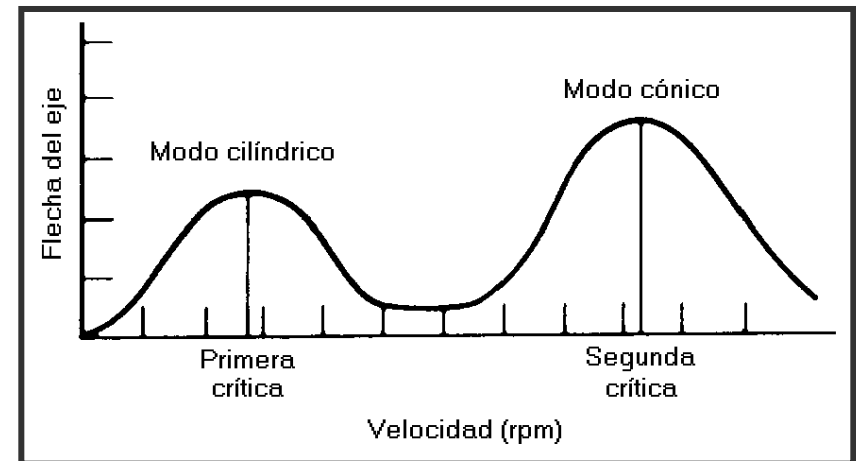
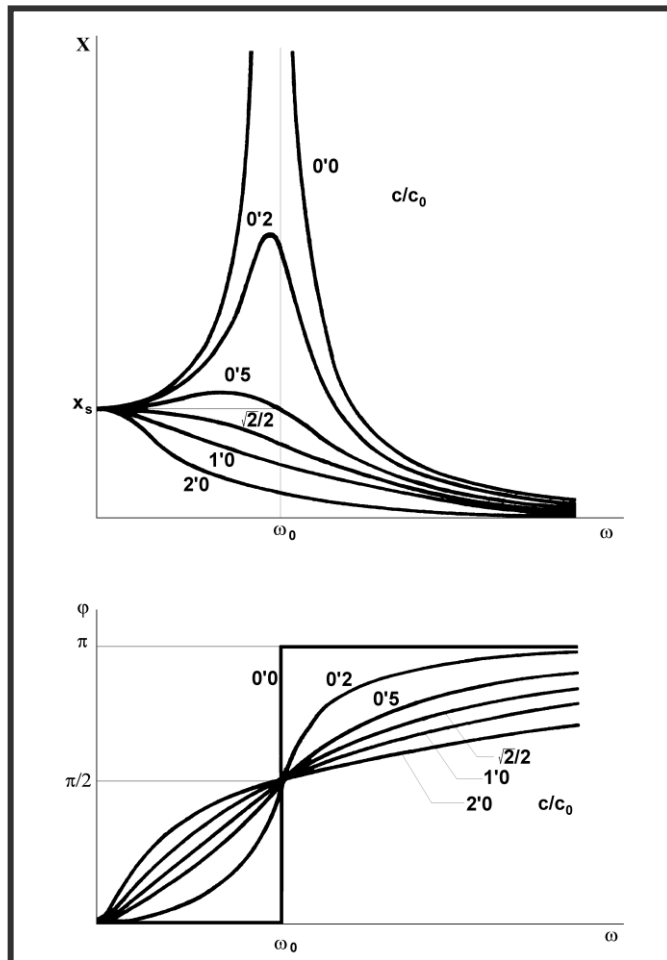
10.6.3. Envolvente de la onda



10.6.4. Orbital

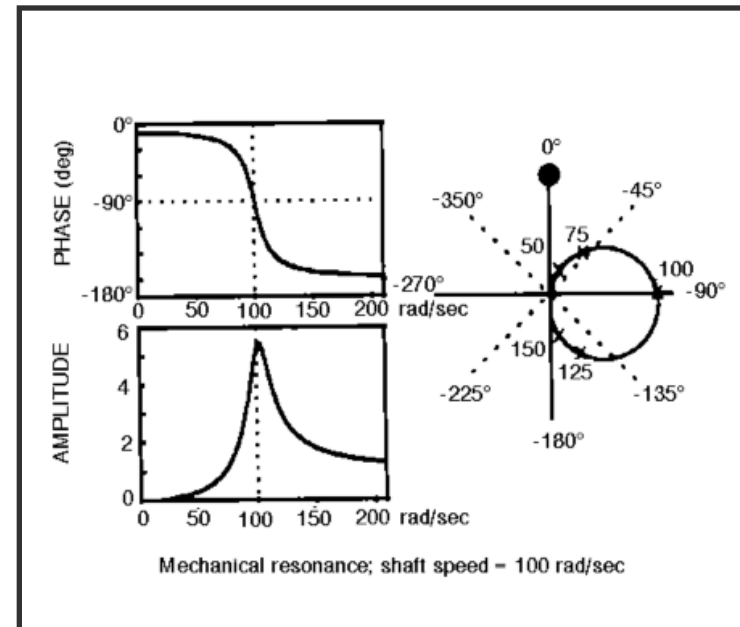
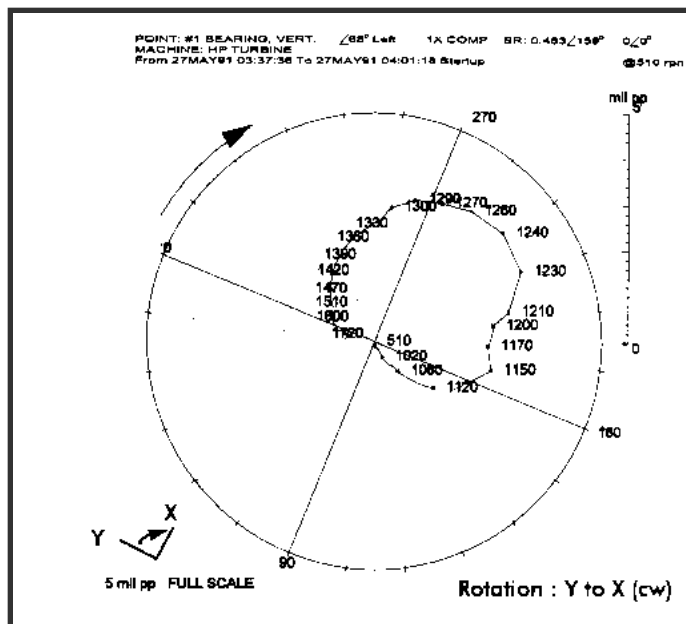


10.6.5. Diagrama de Bode

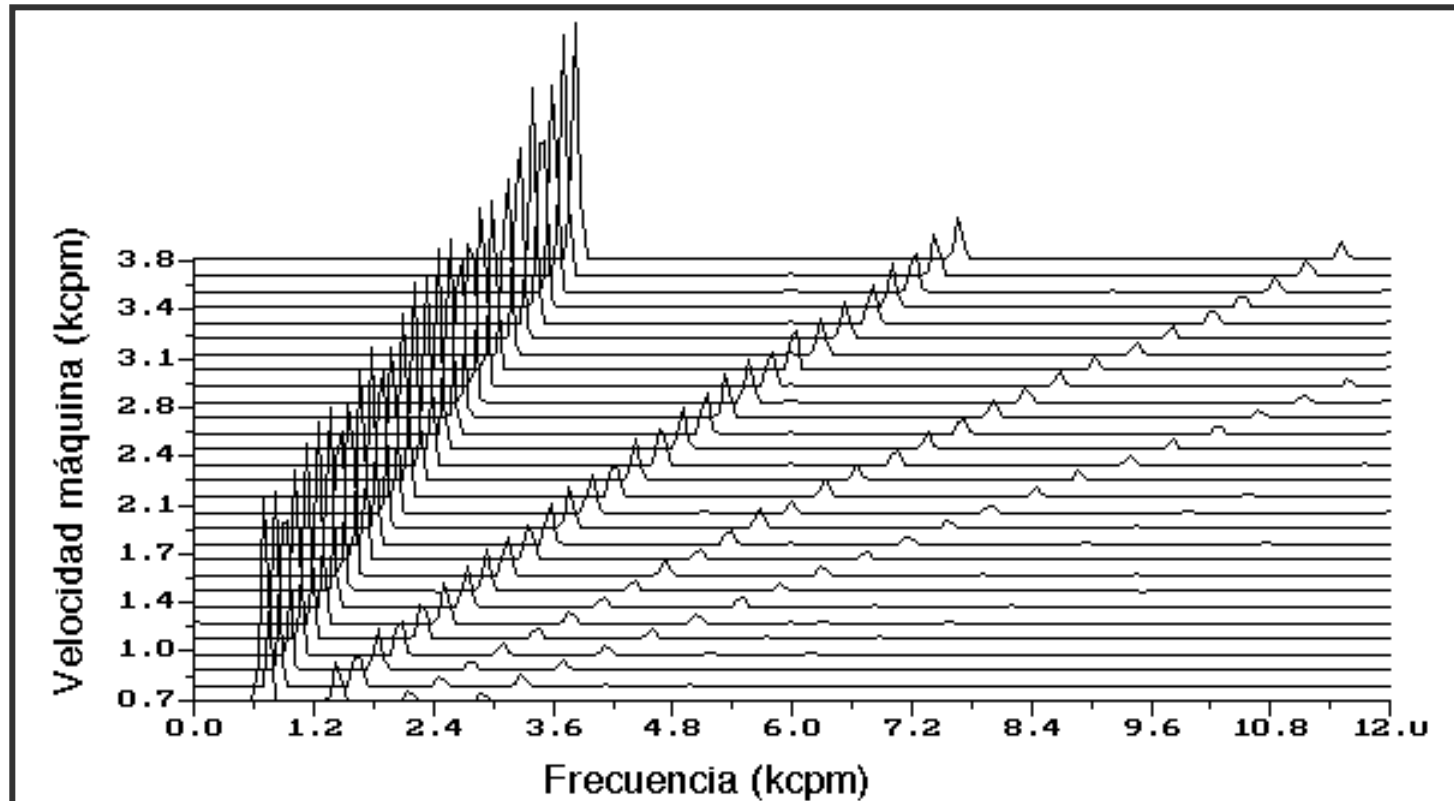


10.6.6. Diagrama Polar

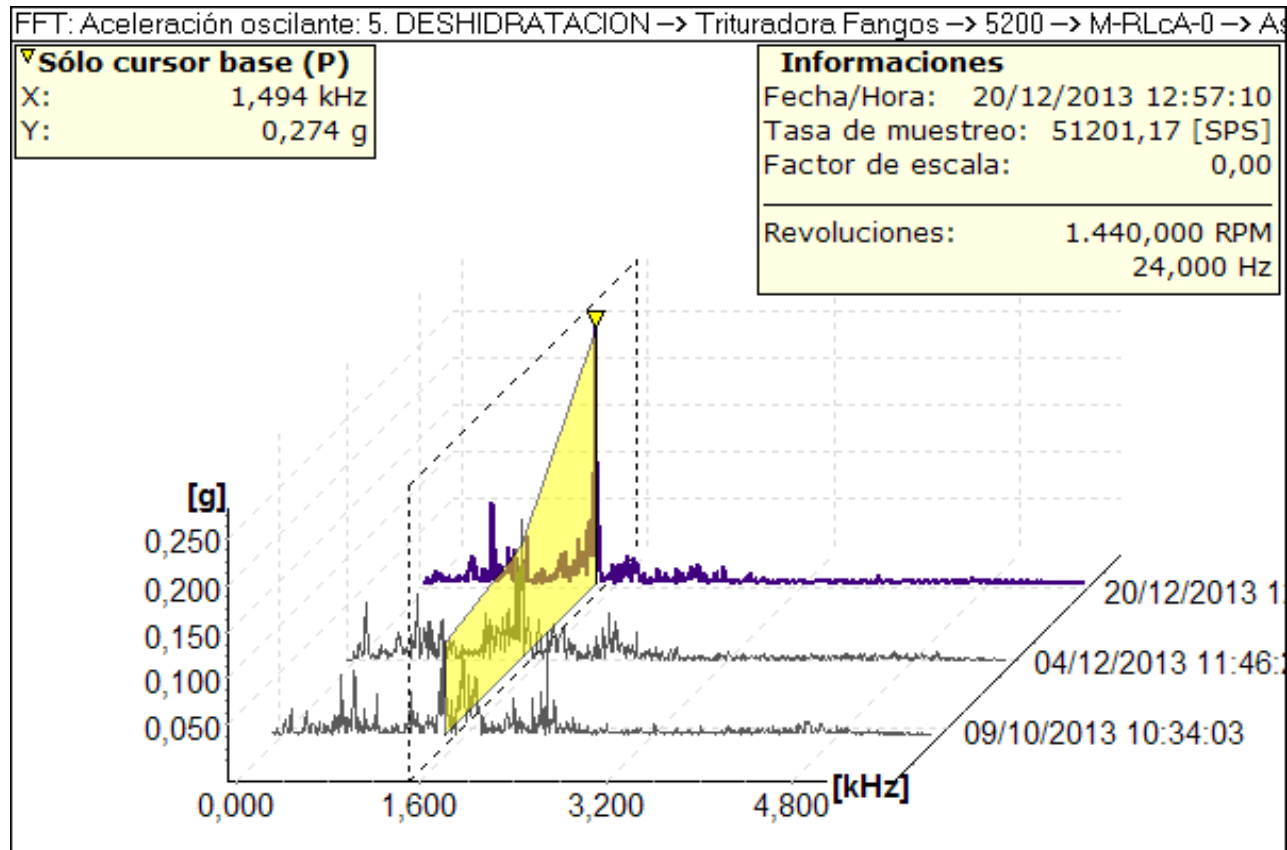
- Se obtiene a partir del diagrama de Bode, eliminando el valor de la velocidad y representando la amplitud y fase en un diagrama vectorial



10.6.7. Mapa espectral

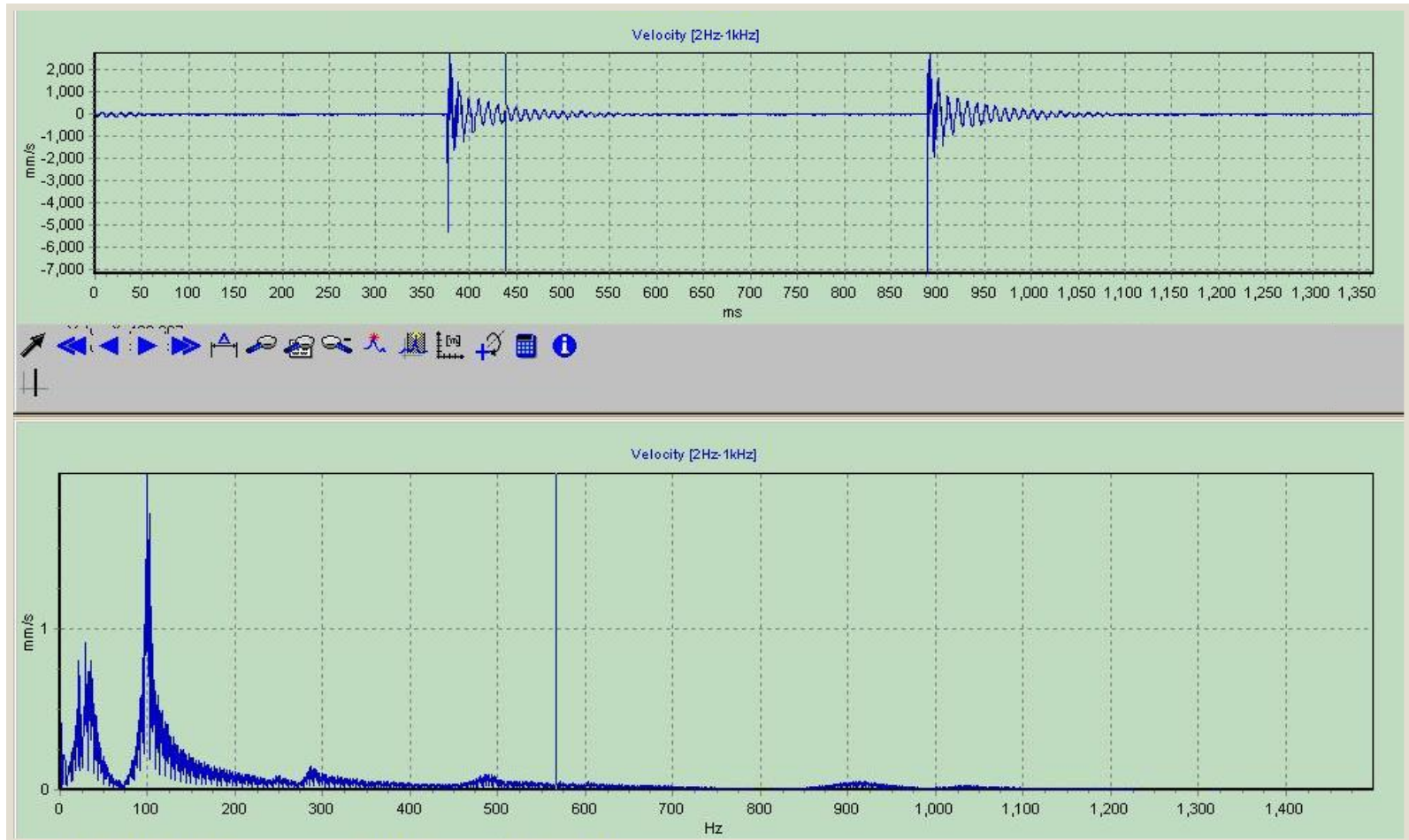


10.6.7. Mapa espectral



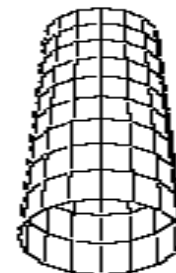
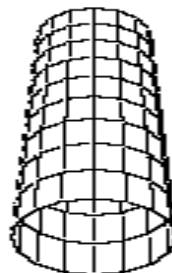
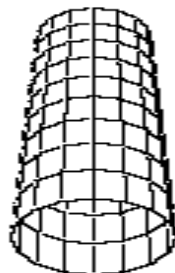
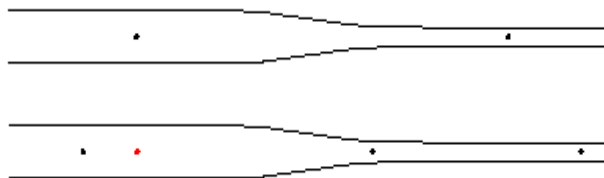
Evolución del componente frecuencial 1494 Hz en el equipo 5200.

10.6.8. Análisis modal



10.6.8. Análisis modal

- También en los equipos estáticos conectados mecánicamente con equipos dinámicos se producen vibraciones que pueden afectar muy negativamente a su vida, pudiendo dar lugar a roturas por fatiga y holguras en bridas y otros elementos intermedios.
- Tal es el caso de tuberías conectadas a bombas, compresores o turbinas; estructuras que actúan como bastidor común de máquinas, etc.



10.6.9. Spike Energy

Para los rodamientos se utilizan técnicas basadas en la medida de la aceleración filtrada en bandas de alta frecuencia, tales como el Spike Energy.

Spike Energy (gSE)	Frecuencias afectadas (KHz)	Estado del rodamiento
$< 0'2 \cdot K_n$	-	bueno
[de $0'2$ a $0'3[\cdot K_n$	> 3	defectos de lubricación
[de $0'3$ a $0'5[\cdot K_n$	$[0'8 - 2]$	erosionado leve
[de $0'5$ a $0'8[\cdot K_n$	$[2 - 5] +$ frecuencias características y bandas laterales	erosionado medio; micropitting
[de $0'8$ a $1'2[\cdot K_n$	$[2 - 5]$ frecuencias características	erosionado severo
[de $1'2$ a $2'5[\cdot K_n$	$[0'8 - 5]$	erosionado muy severo con marcas profundas
$> 2'5 \cdot K_n$	$> 0'8$	lesión generalizada muy grave
$> 5 \cdot K_n$	Todas las frecuencias Aumento de la 1X	Peligro inminente de fallo catastrófico

Siendo K_n la constante de normalización de velocidad,
y n la velocidad de giro de la máquina en r.p.m.

$$K_n = \sqrt{n/1500}$$

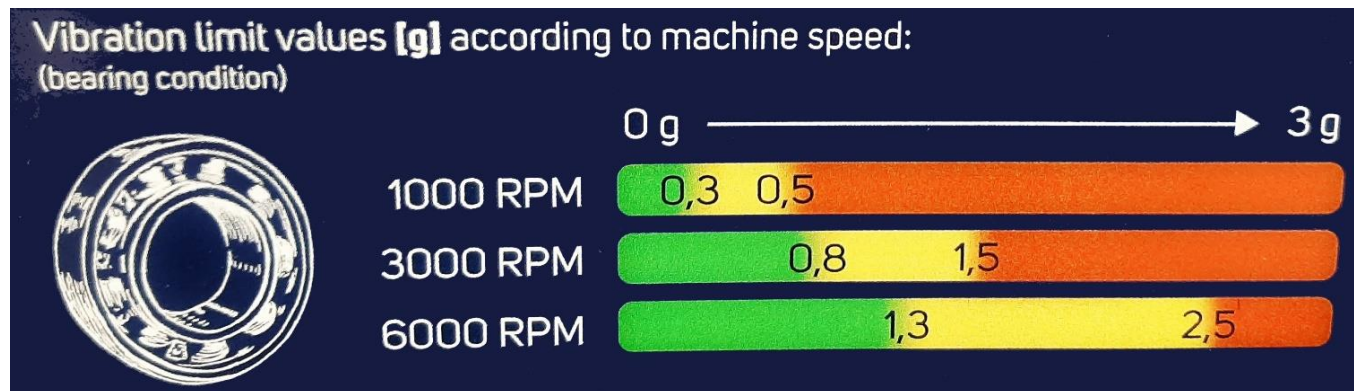
10.6.10. SEE

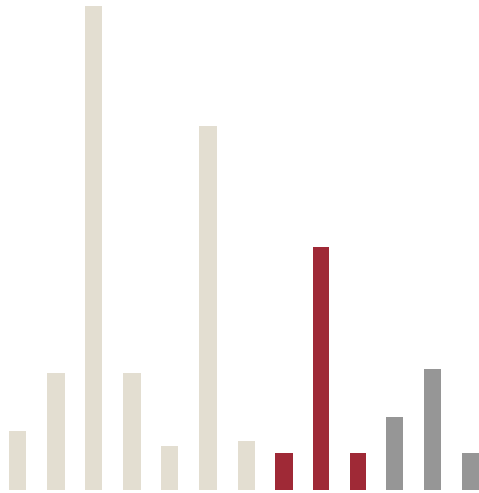
Valor SEE	Estado del rodamiento
0-3	problema no identificable
4-20	defectos de lubricación, defecto leve
21-100	rodamiento defectuoso
>100	defecto severo

10.6.11. Otras técnicas para el análisis de rodamientos

- Otras técnicas similares a la del Spike Energy, como es BCM o D_{eff} (de FAG), para determinar el estado de un rodamiento, utilizan también la medida en aceleración filtrada paso banda en frecuencias de varios kilohercios, algunas veces combinadas con filtros de envolvente.
- Generalmente proporcionan escalas de ayuda al diagnóstico como las siguientes:

Bearing Condition	Good	Pre-alarm	Alarm
D_{eff} (mg)	0-250	250-500	>500





TEMA 11

DEFECTOS EN EQUIPOS DINÁMICOS ROTATIVOS

Ingeniería del Mantenimiento Industrial

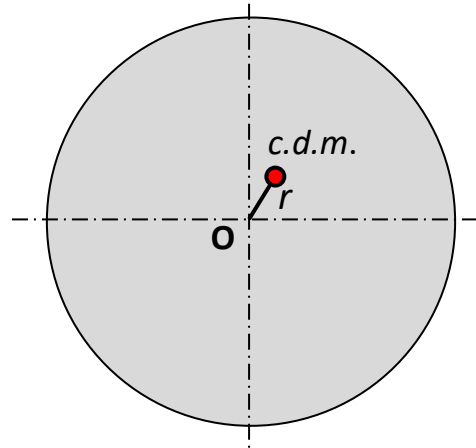


ÍNDICE

- 11.1. Desequilibrio rotórico
- 11.2. Excentricidad rotórica
- 11.3. Desalineación
- 11.4. Soltura
- 11.5. Modulaciones
- 11.6. Resonancias
- 11.7. Defectos en rodamientos
- 11.8. Defectos en engranajes

11.1. DESEQUILIBRIO ROTÓRICO

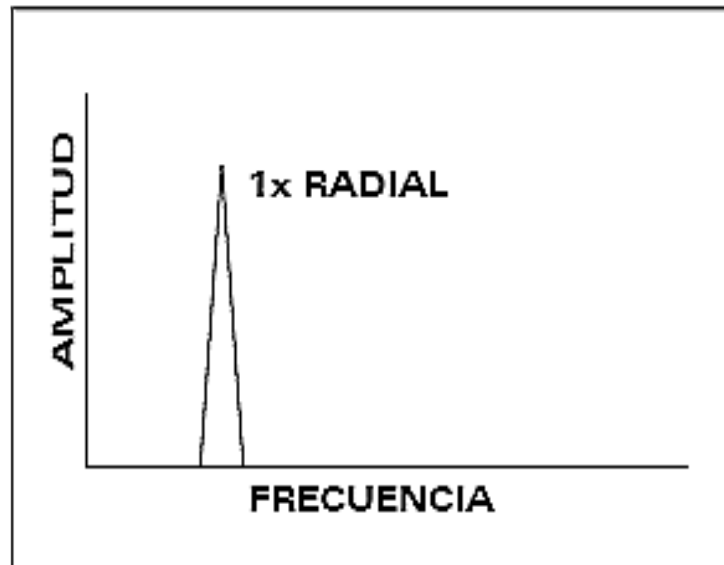
- Es la falta de coincidencia del centro de masas del rotor y su eje de giro.



- El desequilibrio en máquinas rotativas es la fuente más común de vibraciones, ya que todos los rotores, árboles, cigüeñales, ventiladores, hélices, etc., lo presentan en mayor o menor grado.
- El desequilibrio que aún permanece en un rotor, cuando se realiza un equilibrado "perfecto", se denomina desequilibrio residual.

11.1. Desequilibrio rotórico

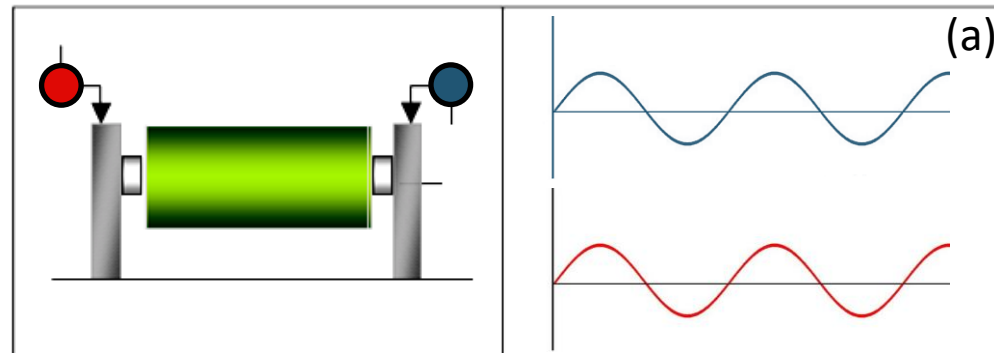
- Se caracteriza por un espectro radial en el que domina fundamentalmente la componente frecuencial 1x.
- La amplitud de la vibración aumenta de forma parabólica con la velocidad de giro.



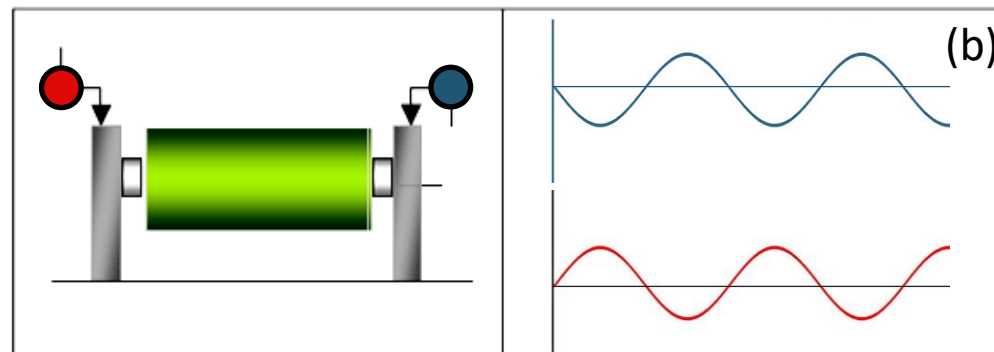
11.1. Desequilibrio rotórico

- Se pueden dar dos casos extremos: estático o dinámico, pero sus espectros radiales 1x son similares. No obstante, si bien en el desequilibrio estático las señales en ambos extremos del rotor se encuentran en fase (a), en el desequilibrio dinámico se puede presentar entre ambos extremos del rotor un desfase de 180° de las respectivas señales sinusoidales radiales (b).

Desequilibrio estático

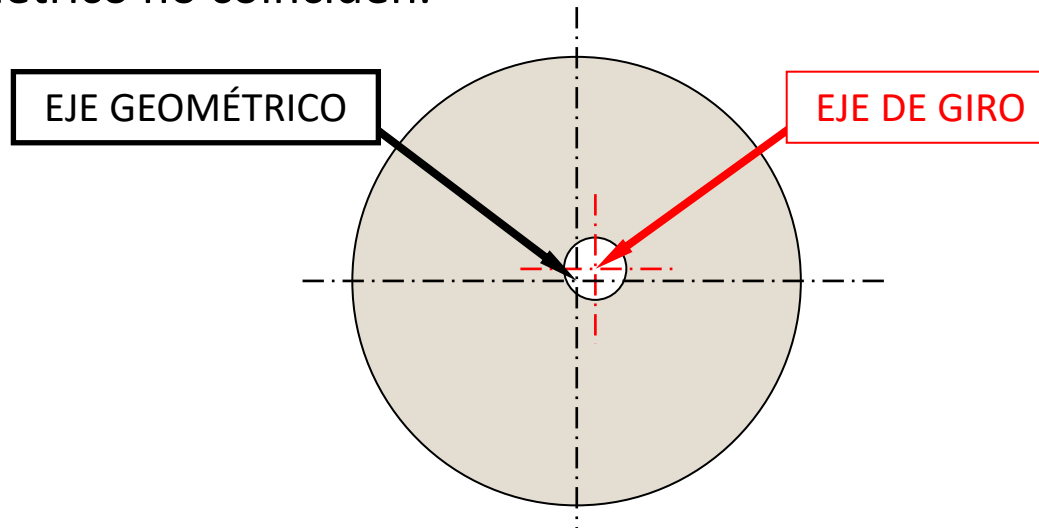


Desequilibrio dinámico



11.2. EXCENTRICIDAD ROTÓRICA

- Se produce cuando el eje de giro de un órgano rotativo y su eje geométrico no coinciden.



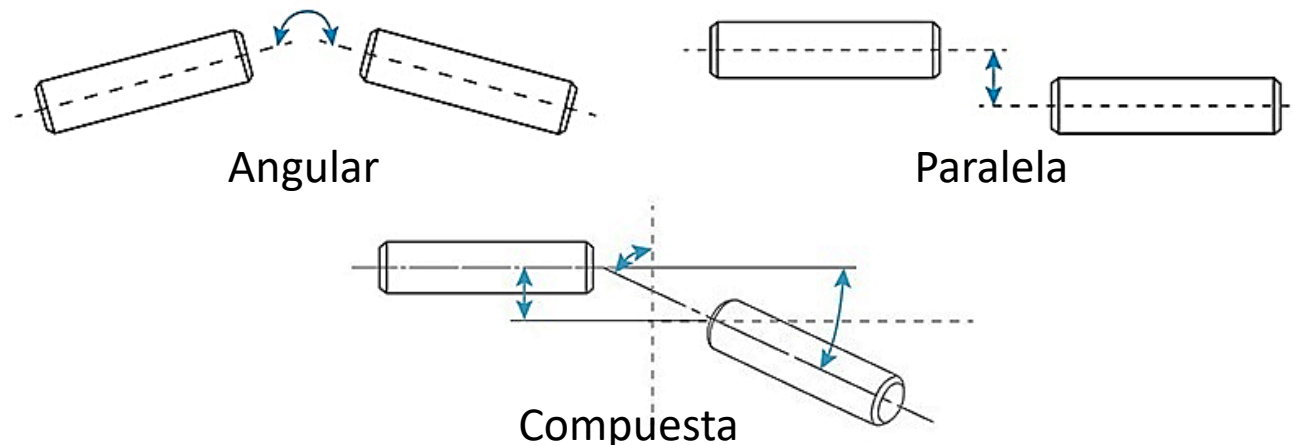
- La excentricidad de un rotor perfectamente equilibrado, se traduce también en un desequilibrio.
- La excentricidad suele ser originada por dos motivos:
 - Defectos de fabricación o mecanización.
 - Defectos de montaje.

11.2. Excentricidad rotórica

- La excentricidad también suele aparecer como consecuencia de la flexión permanente del eje, principalmente en ejes en voladizo, como en el rodete de una bomba centrífuga. El exceso de desequilibrio puede ocasionar la deformación (flexión) permanente del eje, pero también algunas maniobras mecánicas, por ejemplo al intentar soltar mediante mordazas u otras herramientas un eje gripado.
- La presencia de rotores excéntricos origina fuerzas que provocan vibraciones de carácter síncrono, esto es, a la frecuencia de rotación, lo que equivale sobre el espectro, a un componente frecuencial 1x.
- No se debe confundir este defecto con el desequilibrio ya que, si bien ambos presentan firmas espectrales semejantes, son de origen distinto.
- A diferencia del desequilibrio, la amplitud de la vibración 1x permanece en un valor igual al de la excentricidad aun a velocidades próximas a cero.
- Por este motivo, girando manualmente el eje puede detectarse la excentricidad con un simple reloj comparador.

11.3. DESALINEACIÓN

- Es la falta de la necesaria alineación de dos o más elementos de un equipo.
- Cuando se trata de máquinas acopladas, la desalineación es la falta de coincidencia geométrica de los ejes en una línea común.
- Dependiendo de la posición relativa de los ejes, la desalineación puede ser:
 - Desalineación angular (los ejes se cortan).
 - Desalineación paralela (los ejes son paralelos).
 - Desalineación compuesta (los ejes se cruzan sin cortarse).

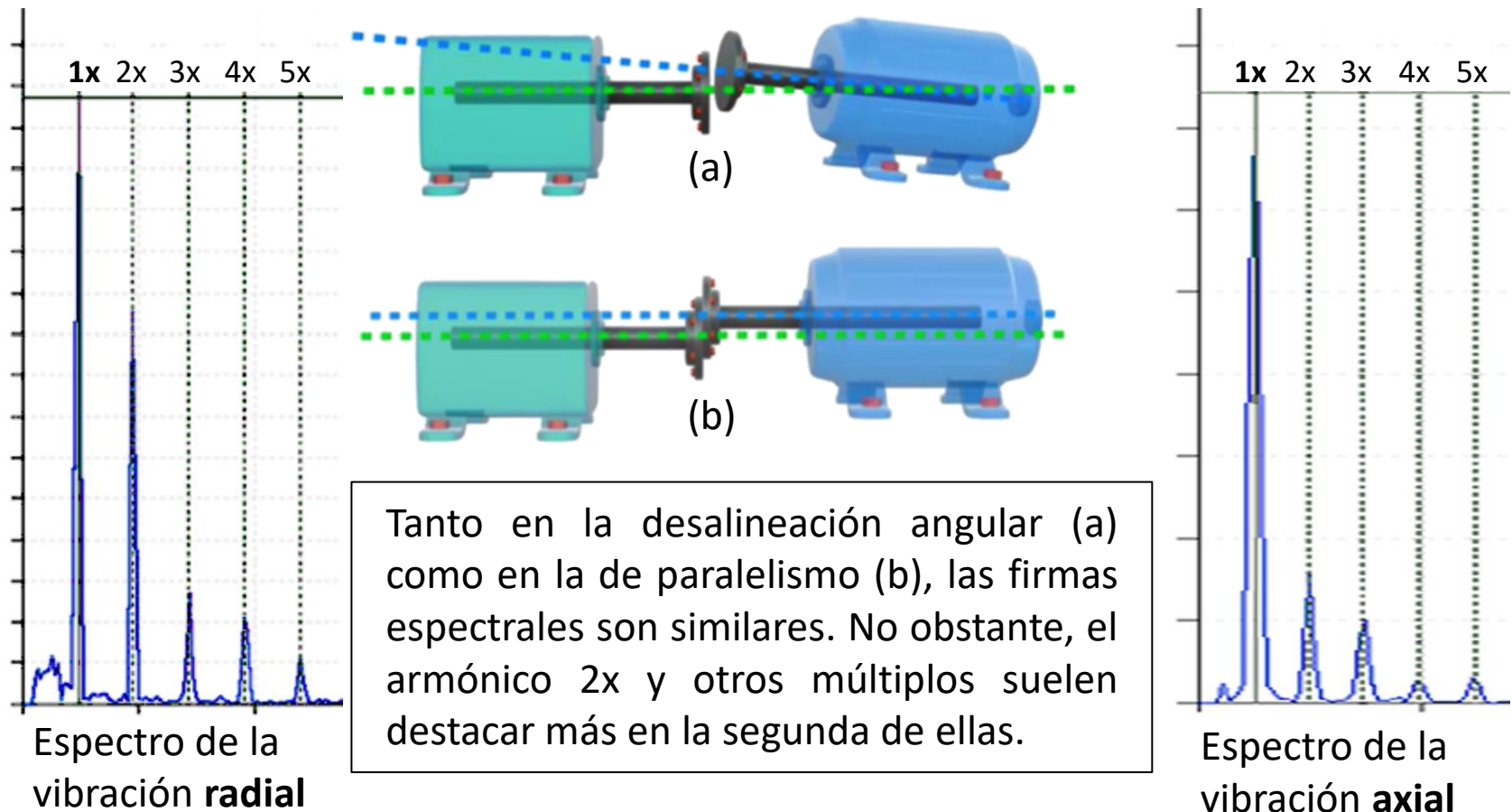


11.3. Desalineación

- La desalineación provoca vibraciones en las direcciones radial y axial de las máquinas acopladas.
- Existen muchas causas que provocan la desalineación, tales como: asentamientos en la fundación, esfuerzos en tuberías, dilataciones térmicas, holguras en rodamientos o cojinetes, soldadura en las fijaciones, una vibración elevada, etc.
- Los rasgos espectrales característicos de la vibración por causa de la desalineación son:
 - Elevados niveles de vibración axial a la frecuencia de giro de la máquina (1x).
 - Presencia destacada del componente de frecuencia doble de la velocidad de giro del eje (2x), en las direcciones radial y axial, además de otros armónicos de orden superior.

11.3. Desalineación

- Aunque el tipo de acoplamiento utilizado modula en gran medida la vibración, la respuesta espectral sigue un patrón similar al siguiente:

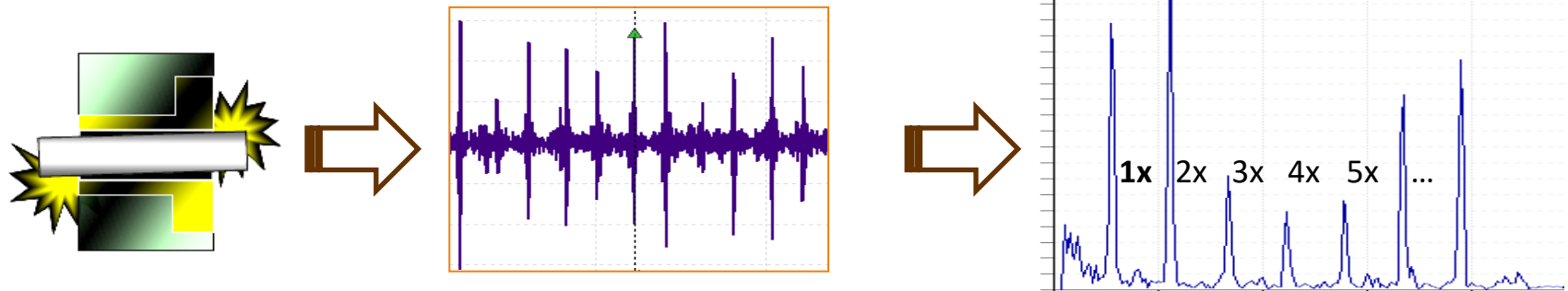


11.4. SOLTURA

- Se denomina soltura mecánica al fenómeno que aparece cuando uno o varios de los puntos de sujeción de una máquina están sueltos o flojos en alguna medida, permitiendo un movimiento entre la máquina y su bancada.
- También se puede producir soltura en uniones (generalmente atornilladas) de piezas de la máquina, tales como: tapas laterales, cuerpo de los polos, conjunto portaescobillas, bridas, etc.; o frecuentemente por un juego excesivo entre piezas ajustadas, como son el eje y el anillo interno, o el anillo externo, del cojinete y su soporte, aunque en estos casos suele utilizarse preferentemente el término **holgura**.
- Aunque en rigor no es una soltura, también puede manifestarse como una soltura un agrietamiento en la bancada de la máquina, de manera que permita un desplazamiento relativo entre las dos partes. Donde se produce esto con mayor frecuencia es en alguna de las patas de la máquina.

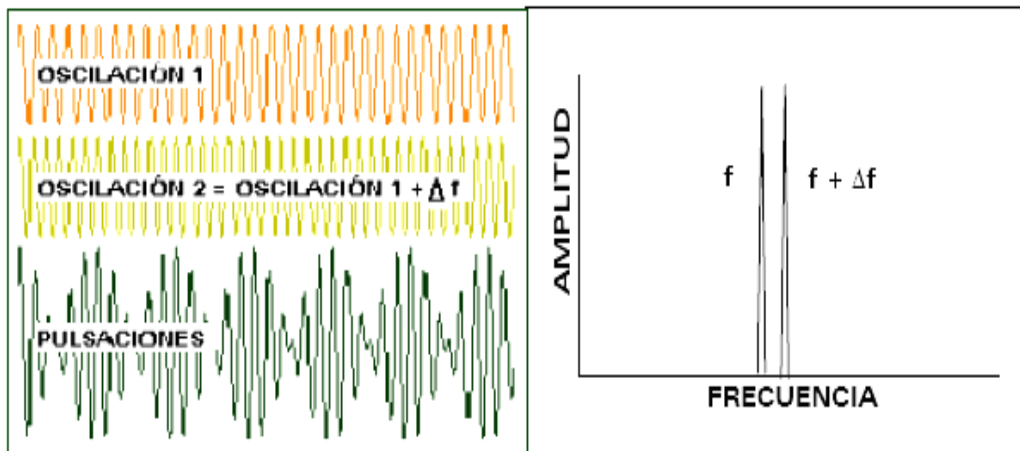
11.4. Soltura

- El movimiento relativo entre las dos partes de la máquina se manifiesta con mayor amplitud en la dirección en la que se tiene la soltura.
- Este desplazamiento provoca finalmente un impacto (a veces truncado) en la dirección de la soltura lo que se observa como una secuencia bien definida de pulsos vibratorios de elevada amplitud en la forma de la onda. La descomposición espectral de esta señal muestra una vibración a la frecuencia de los impactos, pero también a su frecuencia doble ($2x$) y también a frecuencias de múltiplos superiores, tales como $3x$, $4x$, $5x$, etc.
- La forma de onda tiene un aspecto impulsivo y, por tanto, el espectro será similar al de una desalineación, pero con una mayor presencia y amplitud de los armónicos superiores. Sus síntomas son tanto mayores cuanto más cerca se mida de la zona afectada.



11.5. MODULACIONES

- Suele presentarse en bancadas comunes a varias máquinas girando a velocidades muy próximas entre sí (rara vez son exactamente iguales).
- Esta diferencia en las frecuencias hace que, de forma periódica, vaya coincidiendo el máximo de ambas señales de vibración (señales en fase), por lo que se suman ambos valores, y el máximo de una señal con el mínimo de la otra (señales en contrafase), restándose sus valores instantáneos. A lo largo del tiempo el efecto es el de una señal aparentemente armónica modulada en amplitud (señal pulsante). Cuanto más próximas sean ambas frecuencias mayor será el periodo de la modulación producida.



Aunque en rigor no se trata de un defecto, lo cierto es que cuando las máquinas que lo ocasionan tienen niveles de vibración altos, el resultado puede llegar a ser catastrófico.

11.6. RESONANCIAS

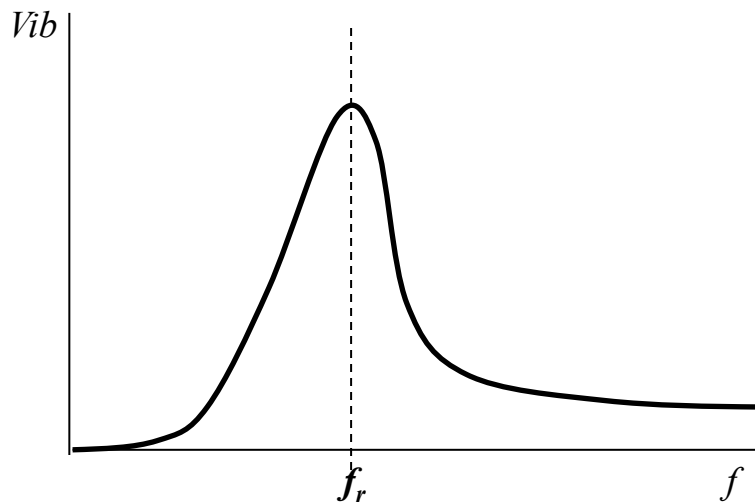
- Las vibraciones resonantes son inherentes a cualquier elemento mecánico. En el diseño de los equipos e instalaciones es esencial tener en cuenta este fenómeno con el fin de evitar elevados niveles de vibración que puedan llegar a comprometer la integridad del elemento afectado.
- Es difícil diseñar un equipo dinámico en el cual ninguna frecuencia natural de sus componentes (bastidor, estructuras, tuberías, etc.) coincida en ningún momento con alguna frecuencia del espectro de vibración presente en la máquina.
- Si en un equipo rotativo esto sucede a frecuencias elevadas, el problema – en general- no reviste mayor gravedad, pero cuando la coincidencia se produce a la frecuencia de giro, o a algunos de sus primeros múltiplos, las consecuencias pueden ser catastróficas.
- Por tanto, es importante saber identificar las resonancias que se excitan por las diferentes fuerzas generadas por los elementos de la máquina, ya sea durante la puesta en marcha del equipo, la parada o durante la operación.

11.6. Resonancias

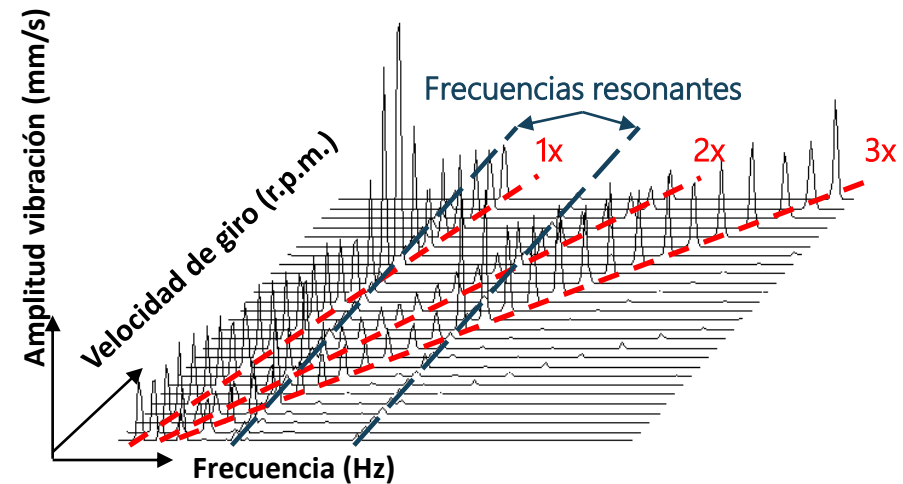
- Durante el arranque o la parada de una máquina, si la velocidad de giro pasa por una frecuencia de resonancia de algún componente, la amplitud de la vibración aumenta significativamente en este.
- Si se trata de algún elemento estructural importante (eje, tuberías, bastidor, etc.) es esencial que, durante el arranque o la parada, el tiempo de coincidencia de la excitación y la frecuencia resonante sea el menor posible, ya que el aumento de la amplitud de la vibración es exponencial con el tiempo. Lógicamente si la velocidad de giro coincide con alguna de estas frecuencias la vibración puede llegar a ser muy elevada.
- Los métodos principales para identificar las frecuencias resonantes son:
 - Métodos dinámicos: diagrama de Bode, diagrama en cascada.
 - Métodos estáticos: análisis modal (de vibración libre), modelización por M.E.F.

11.6. Resonancias

Variando la velocidad de giro de la máquina entre los valores mínimo y máximo posibles, al representar el nivel de vibración frente a la frecuencia de giro de la máquina se obtiene un *diagrama de Bode*.

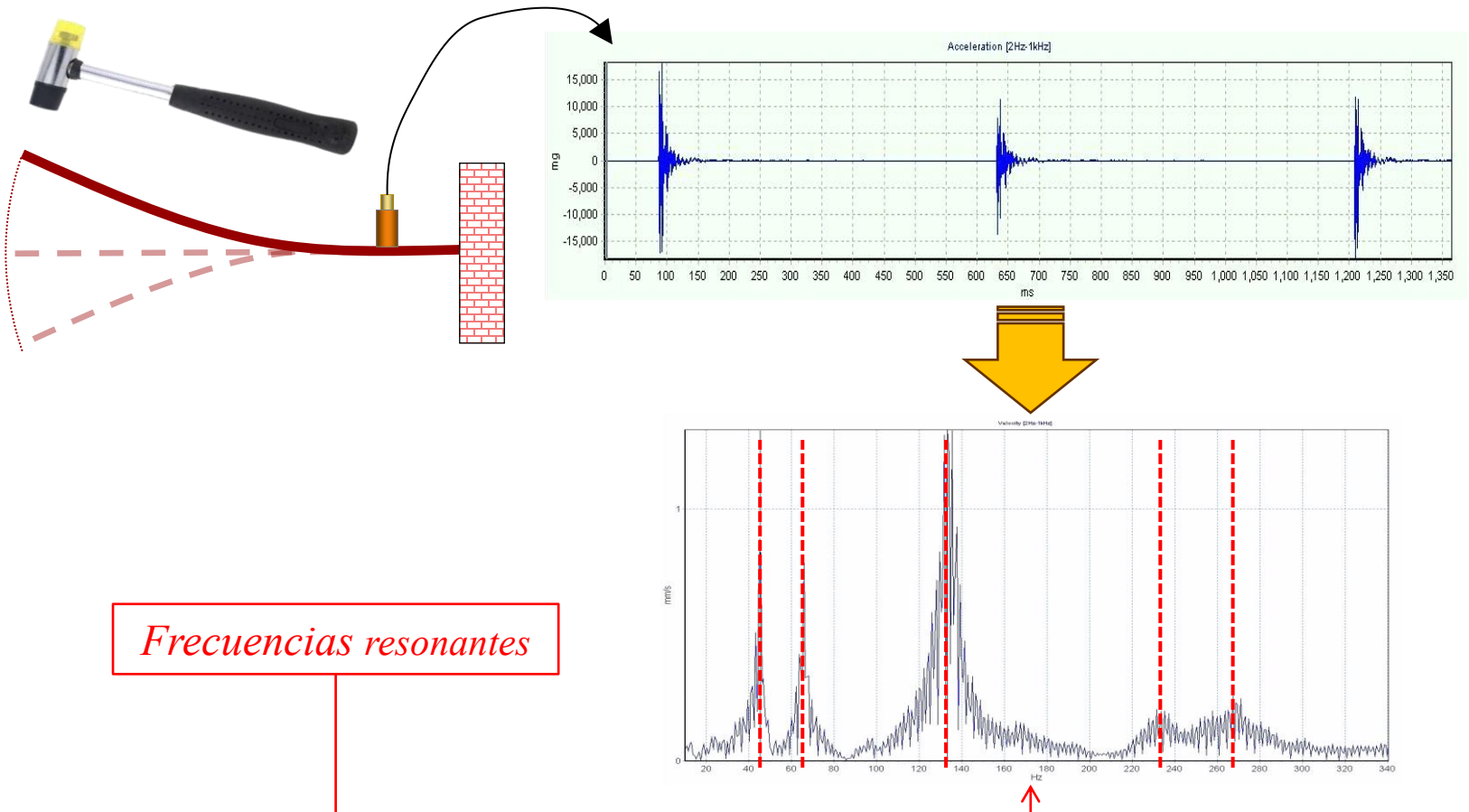


Variando la velocidad de giro de la máquina entre los valores mínimo y máximo posibles, al realizar sucesivos espectros de la vibración para diferentes frecuencias de giro se obtiene un *diagrama en cascada* (mapa espectral).



11.6. Resonancias

- Mediante un impacto controlado se excitan las frecuencias resonantes de la estructura golpeada.



11.7. DEFECTOS EN RODAMIENTOS

- Los rodamientos son componentes críticos en cualquier máquina, a los que se les exige alta fiabilidad, durabilidad y capacidad de carga. Sin embargo, su vida útil real puede ser inferior a la prevista debido a procesos de deterioro progresivo que desembocan en averías, responsables de un elevado porcentaje de fallos en los EDRs.
- Por ello, resulta esencial supervisar periódicamente su estado mediante técnicas de control basadas en la medición de parámetros como vibraciones, ruido y temperatura.
- En condiciones ideales, los rodamientos no fallan por desgaste, sino por fatiga del material, causada por cargas cíclicas que generan esfuerzos variables bajo la superficie.
- Cuando las cargas son excesivas, la lubricación es deficiente o actúan agentes externos, el deterioro del rodamiento puede producirse mucho antes de lo que su vida nominal hacía prever.

11.7. Defectos en rodamientos

- La causa del fallo prematuro de un rodamiento no siempre puede determinarse de forma precisa, puesto que los síntomas pueden ser idénticos, aunque procedan de motivos distintos.
- Las causas de fallo más frecuentes se pueden agrupar en las siguientes categorías, de las que se indica algunos ejemplos comunes:
 - I. **Montaje:** método incorrecto, polución en el montaje, colocación poco cuidadosa, piezas receptoras en mal estado...
 - II. **Condiciones de funcionamiento:** sobrecargas (por desequilibrio, desalineación, tensiones térmicas...), vibraciones ajenas (cavitación, engranajes...), flexión en los ejes...
 - III. **Condiciones de contorno:** temperaturas extremas, paso de corriente eléctrica, presencia de agentes contaminantes (agua, polvo, gases, etc.)...
 - IV. **Lubricación:** lubricante inadecuado, cantidad incorrecta, mantenimiento escaso...

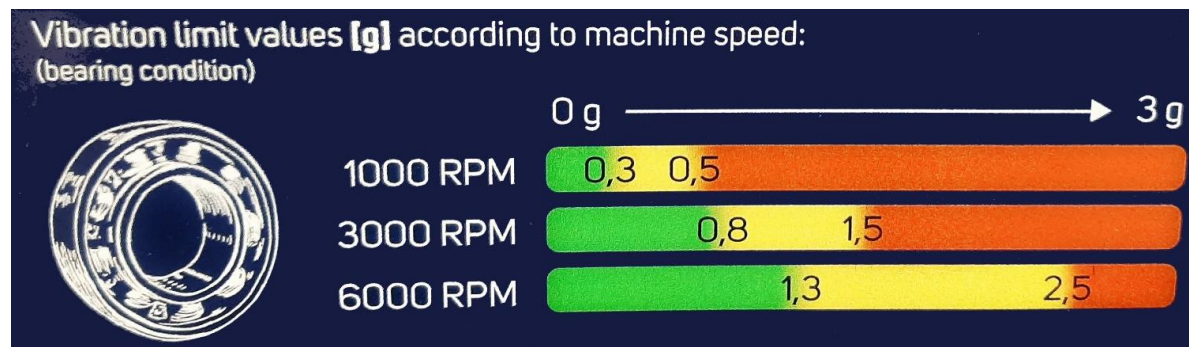
11.7. Defectos en rodamientos

- Los síntomas de deterioro, especialmente al inicio del proceso, dependen del origen del fallo, que y es cuando mejor puede detectarse la causa. En estadios avanzados los síntomas se generalizan y, aunque es más fácil detectar el mal estado del rodamiento, es más difícil determinar el origen.
- Atendiendo al tipo de daño inicial en el rodamiento, puede establecerse una clasificación simple:
 - Daños puntuales: Son aquellos en los que existe algún tipo de irregularidad singular en las superficies de rodadura, tales como: adherencias, arañazos, marcas, indentaciones, grietas, cráteres, muescas, huellas, etc. Son frecuentes este tipo de lesiones cuando se golpea el rodamiento durante el montaje, pero también en el transporte de grandes máquinas, por corrosión cuando la máquina ha permanecido largo tiempo parada, etc.
 - Daño generalizado: Es aquel en el que las lesiones que aparecen afectan a una zona amplia de las superficies de rodadura (pista interior, exterior, o elementos rodantes). Son causas comunes los defectos de lubricación, sobrecarga o el deterioro progresivo por fatiga de las superficies de rodadura.

11.7. Defectos en rodamientos

- En general, el deterioro en un rodamiento causa un aumento de la vibración en bandas de alta frecuencia, por lo que las técnicas para su detección utilizan la medida de la aceleración de la vibración con filtros paso alto*.
- La medida de la aceleración suele referirse a la aceleración de la gravedad, de ahí que su unidad sea el g (o mg). Las figuras siguientes muestran unas escalas que, a falta de referencias propias, son comúnmente utilizadas:

Bearing Condition	Good	Pre-alarm	Alarm
D_{eff} (mg)	0-250	250-500	>500



* Dependiendo de la técnica utilizada (Spike Energy, BCM, D_{eff} , REBAM, SPM...) se utilizan frecuencias de corte distintas, que pueden ir desde unos pocos kilohercios a frecuencias propias de los ultrasonidos.

11.7. Defectos en rodamientos

- La aparición de una lesión puntual en las pistas de rodadura o en los elementos rodantes, provoca impactos que se repiten cíclicamente. La periodicidad con la que se repite el fenómeno es distinta según el elemento que se encuentre dañado.
- La frecuencia de la vibración producida por estos impactos depende de las dimensiones del rodamiento y el número de elementos rodantes. Generalmente, el software de los instrumentos de medida y los fabricantes suelen proporcionar estas frecuencias para cada rodamiento.
- Así, puede distinguirse distintas frecuencias según dónde se situe la lesión:
 - Frecuencia fundamental de traslación del tren de elementos rodantes.
 - Frecuencia por defecto en anillo exterior.
 - Frecuencia por defecto en anillo interior.
 - Frecuencia de giro del elemento rodante.

11.8. DEFECTOS EN ENGRANAJES

- Los defectos en engranajes se caracterizan por espectros de vibración complejos que son generalmente fáciles de reconocer pero difíciles de valorar. La dificultad se debe principalmente a que el número de fuentes de vibración en una caja de múltiples engranajes puede ser alto y, además, los rodamientos que soportan los piñones interfieren en las mismas bandas frecuenciales de vibración.
- Al igual que sucede en los rodamientos, es más fácil identificar el origen del fallo en las etapas tempranas del mismo, donde las frecuencias características del engranajes se definen de forma limpia.
- Estas frecuencias dependen de la velocidad de giro de los piñones y su número de dientes. Además, muy frecuentemente vienen acompañadas de bandas laterales equiespaciadas a la velocidad de giro de alguno de los ejes.
- En las etapas de desgaste generalizado en las superficies de los dientes, se produce un aumento de la vibración de alta frecuencia en banda ancha que puede llegar a enmascarar estas frecuencias características.

11.8. Defectos en engranajes

- Las frecuencias características fundamentales de defecto en un engranaje son las siguientes:
 - Frecuencia rotacional de la rueda motriz.
 - Frecuencia rotacional de la rueda conducida.
 - Frecuencia de engrane.
 - Frecuencia de repetición de dientes.
- De todas ellas, la más frecuente, y fácil de diferenciar, es la frecuencia de engrane que se obtiene como producto de la velocidad de giro de una de las ruedas por el número de dientes que tiene*.
- Las causas más comunes de fallo en un engranaje son las siguientes: lubricación deficiente (falta de lubricante, incorrecta elección del lubricante, lubricante contaminado...), golpes o vibraciones de otras fuentes, sobrecarga (desalinación, montaje excéntrico...), incentaciones o rotura de dientes...

* Obsérvese que da igual la rueda que se tome, conductora o conducida, ya que la relación entre el número de dientes entre ellas es igual a la relación inversa de sus respectivas velocidades.