



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES

Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales

Implantación de mantenimiento predictivo en líneas de mecanizado de piezas para motor.

Autor:

Luengo Vicente, Miguel

Tutor:

**Manso Burgos, Gabriel
Departamento de CM e IM, EGI,
ICG y F, IM e IPF / Ingeniería
Mecánica**

Valladolid, Julio 2017.



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES

Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales

Implantación de mantenimiento predictivo en líneas de mecanizado de piezas para motor.

Autor:

Luengo Vicente, Miguel

Tutor:

**Manso Burgos, Gabriel
Departamento de CM e IM, EGI,
ICG y F, IM e IPF / Ingeniería
Mecánica**

Valladolid, Julio 2017.



Se agradece la especial colaboración de Mario del Campo Gómez
y de los especialistas en mantenimiento industrial David Valencia Nieto
y José Luis Martín Vallejo.

RESUMEN

En las grandes superficies industriales, resulta crucial realizar acciones de mantenimiento en los equipos en base al estado de deterioro de sus elementos. El objetivo de los sistemas de mantenimiento predictivo o condicional es conocer la evolución del ciclo de vida de cierto elemento mediante el análisis de magnitudes íntimamente relacionadas con su estado de degradación. En base a un conocimiento certero del estado de los equipos, se puede decidir con precisión el momento en el que se deben llevar a cabo las pertinentes acciones de mantenimiento.

Se documenta e ilustra el proyecto teórico con la experiencia real de la implantación del mantenimiento predictivo en líneas industriales de mecanizado de piezas de motores de automóviles. En concreto, la implementación tiene lugar en líneas de fabricación de culatas para motores del Grupo Renault.

PALABRAS CLAVE

Mantenimiento predictivo, mantenimiento condicional, mecanizado, industria 4.0, LEAN.



ABSTRACT

In great industrial facilities, machine maintaining actions, based on its components degradation state, have crucial influence over production performance. Condition Based Maintenance (CBM) or predictive maintenance systems target is acknowledging life cycle temporal evolution of certain element, through the analysis of magnitudes intimately related with its degradation state. An accurate information about machine state enables us to determine the perfect maintenance point.

Theoretic paper is documented and illustrated with automotion part machining line implementation of predictive maintenance. Indeed, implementation takes place in cylinder head machining lines for Group Renault powertrains.

KEYWORDS

Predictive maintenance, condition based maintenance, machining, 4.0 industry, LEAN.



ÍNDICES



ÍNDICE DE CONTENIDOS

| | |
|--|-----|
| INTRODUCCIÓN..... | 15 |
| ALCANCE..... | 21 |
| OBJETIVOS..... | 23 |
| PARTE I: ESTUDIO PREVIO..... | 25 |
| Capítulo 1: El motor de combustión y sus componentes..... | 27 |
| Capítulo 2: Proceso de fabricación de culata y bloque motor..... | 33 |
| Capítulo 3: Descripción de línea de mecanizado de culatas..... | 39 |
| PARTE 2: IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO..... | 45 |
| Capítulo 4: Elementos de equipos controlados..... | 47 |
| Capítulo 5: Control térmico..... | 51 |
| Capítulo 6: Control vibratorio..... | 59 |
| Capítulo 7: Control de parámetros máquina..... | 67 |
| Capítulo 8: Sistema solución propuesto..... | 71 |
| Capítulo 9: Ganancia atribuible a la instalación..... | 79 |
| PARTE 3: ANÁLISIS DE RESULTADOS..... | 83 |
| Capítulo 10: Situación final prevista..... | 85 |
| Capítulo 11: Situación final alcanzada..... | 89 |
| Capítulo 12: Mejora en el Plan de Mantenimiento Preventivo..... | 103 |
| CONCLUSIONES..... | 109 |
| BIBLIOGRAFÍA..... | 113 |



ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

| | |
|---|----|
| Ilustración 1 Motor Grupo Renault..... | 16 |
| Ilustración 2 Evolución temporal de la industria..... | 19 |
| Ilustración 3 Ciclo de Otto | 28 |
| Ilustración 4 Despiece de motor de 4 cilindros en línea | 29 |
| Ilustración 5 Bloque motor | 29 |
| Ilustración 6 Culata | 30 |
| Ilustración 7 Pistones | 30 |
| Ilustración 8 Biela | 31 |
| Ilustración 9 Cigüeñal | 31 |
| Ilustración 10 Volante de inercia | 32 |
| Ilustración 11 Apoyos para el cigüeñal..... | 35 |
| Ilustración 12 Mecanizado de las camisas para pistones | 35 |
| Ilustración 13 Colector de admisión | 36 |
| Ilustración 14 Colector de escape | 36 |
| Ilustración 15 Cara inferior de la culata | 37 |
| Ilustración 16 Detalle de zona de guías y asientos | 37 |
| Ilustración 17 Marcado Datamatrix | 41 |
| Ilustración 18 Esquema de centro de mecanizado de doble electrohusillo | 41 |
| Ilustración 19 Centro de mecanizado..... | 42 |
| Ilustración 20 Detalle de válvula con su guía y su asiento | 42 |
| Ilustración 21 Detalle de montaje de válvula..... | 43 |
| Ilustración 22 PLC SIEMENS S7-300..... | 54 |
| Ilustración 23 Fuente de alimentación SIEMENS SITOP | 54 |
| Ilustración 24 Contactor SIEMENS Sirius | 54 |
| Ilustración 25 Interruptor magnetotérmico Schneider..... | 55 |
| Ilustración 26 Extracción de norma UNE-HD 60364-5-52:2014..... | 55 |
| Ilustración 27 Termografía (defecto de mal contacto) | 56 |
| Ilustración 28 Termografía a elementos de potencia..... | 56 |
| Ilustración 29 Climatizador de armario eléctrico..... | 57 |
| Ilustración 30 Distribución de causas de defectos en elementos eléctricos | 57 |
| Ilustración 31 Defecto de desequilibrio, velocidad (mm/s) frente a frecuencia (rpm) | 61 |
| Ilustración 32 Defecto de desalineación, velocidad (mm/s) frente a frecuencia (rpm) | 62 |
| Ilustración 33 Defecto de engranajes, velocidad (mm/s) frente a frecuencia (rpm) | 62 |
| Ilustración 34 Parámetros geométricos de rodamientos para análisis vibratorio..... | 63 |
| Ilustración 35 Defectos en rodamientos, velocidad (mm/s) frente a frecuencia (rpm)..... | 64 |
| Ilustración 36 Defectos en rodamientos, aceleración (g) frente a frecuencia (rpm)..... | 64 |
| Ilustración 37 Distribución de causas de defectos en electrohusillos | 65 |
| Ilustración 38 Detalle de sujección de pieza y de herramienta..... | 69 |
| Ilustración 39 Regado general (izquierda) y de herramienta (derecha)..... | 70 |
| Ilustración 40 Evolución típica del estado de degradación..... | 72 |
| Ilustración 41 Cámara de infrarrojos..... | 74 |
| Ilustración 42 Acelerómetro y procesador | 75 |
| Ilustración 43 Sensores de presión, caudal y temperatura | 76 |
| Ilustración 44 Posicionamiento del acelerómetro sobre electrohusillo | 92 |
| Ilustración 45 Rodamiento SKF 7013ACE/HCP 4A H1DT, frecuencias naturales..... | 93 |
| Ilustración 46 Espectro de aceleración (mg-Hz) entre 0Hz y 700Hz | 93 |



| | |
|--|-----|
| Ilustración 47 Espectro de aceleración (mg-Hz) entre 1300Hz y 2600Hz..... | 94 |
| Ilustración 48 Acelerómetro atornillado sobre electrohusillo. | 95 |
| Ilustración 49 Rodamiento SKF 71920-ACDGB/P4A, frecuencias naturales..... | 96 |
| Ilustración 50 Espectro de velocidad (mm/s-Hz) entre 0Hz y 60Hz..... | 96 |
| Ilustración 51 Espectro de velocidad (mm/s-Hz) entre 300Hz y 650Hz..... | 97 |
| Ilustración 52 Evolución de degradación en rodamientos de husillo 1 y 2. | 98 |
| Ilustración 53 Aceleraciones de pico en electrohusillo 2..... | 99 |
| Ilustración 54 Diámetro de alojamiento de asiento de escape..... | 100 |
| Ilustración 55 Diámetro de alojamiento de asiento de escape..... | 100 |
| Ilustración 56 Ficha de formación de especialistas. | 105 |
| Ilustración 57 Detalle exterior de maleta para análisis de vibraciones..... | 105 |
| Ilustración 58 Detalle interior de maleta para el análisis de vibraciones..... | 106 |

INTRODUCCIÓN



Introducción

El trabajo presentado se desarrolla durante el período de estancia en prácticas en la Factoría de Motores de la fábrica de Renault Valladolid. Gracias a los equipos e instalaciones de la empresa se han documentado con casos reales los conceptos expuestos.

La empresa se denomina Groupe Renault, es una multinacional francesa con sede en el distrito de Bologne Billancourt, en París. Su objetivo es la fabricación de automóviles que satisfagan las necesidades de un amplio abanico de clientes distribuidos por todo el mundo.

La Factoría de Motores de Valladolid se encarga de la producción de los motores (ilustración 1) que se montan en más del 50% de los automóviles de la compañía. Por lo tanto, la optimización continua de su rendimiento juega un papel transcendental en el progreso global de la empresa. Actualmente se fabrican tres tipos de motores en la fábrica: Diesel K9, Gasolina H5Ft y Gasolina H4Bt. En la factoría de motores entra un importante flujo de piezas en bruto provenientes de fundición, acero o aluminio; tras pasar por las líneas de mecanizado, pueden montarse en los motores allí producidos o exportarse a otras factorías de la compañía. Subrayar que desde la factoría se exportan piezas de motor y motores completos ya montados. De hecho, el 65% de los motores que se montan en la Factoría de Motores de Valladolid se destinan a la exportación para instalarse en los otros vehículos del grupo.



Ilustración 1 Motor Grupo Renault

Algunas de las piezas sufren un proceso de transformación previo a su montaje. Las líneas que atañen este proyecto son de fabricación de piezas. Se fabrican las múltiples piezas que componen el corazón del motor del automóvil. Se cuenta con un total de 20 líneas de mecanizado que transforman la culata, el cárter de cilindros, el cigüeñal, el árbol de levas, la biela y el volante de inercia. El **mecanizado** es un proceso de fabricación que consiste en la eliminación de material (arranque de viruta) de una pieza inicialmente basta con el fin de cumplir con unas especificaciones dimensionales y un buen acabado superficial.

A diferencia de las líneas de montaje, las líneas de mecanizado están casi completamente automatizadas. Esto implica que los puestos de trabajo manual son mínimos, y los trabajadores en la línea realizan principalmente actividades de mantenimiento, limpieza, engrase y control de calidad.

El departamento de Mejora Continua se encarga de llevar a cabo acciones que aumenten el rendimiento del proceso en todos sus aspectos. Cuenta con especialistas de Métodos y Tiempos y expertos en LEAN Manufacturing. El equipo de Métodos y Tiempos trata de aplicar métodos más sencillos o eficientes para aumentar la productividad y reducir el tiempo de ciclo. El equipo de LEAN Manufacturing se encarga de identificar y eliminar todas las actividades que no aportan valor añadido al producto ni al proceso. La filosofía **LEAN** busca eliminar todo aquello que no tiene un efecto positivo, una ganancia, sobre la producción. Se puede realizar un estudio LEAN de cualquier actividad, lo importante es cuestionar el motivo de todo lo que se hace para identificar aquello que es inútil en el proceso. El paso clave es la observación e identificación de las tareas mejorables.

Este estudio se realiza en el ambiente del equipo LEAN del departamento de Mejora Continua en colaboración con el grupo de mantenimiento de las líneas de fabricación de piezas prismáticas: culata y cárter superior. En concreto, se busca la implementación de diversas técnicas de mantenimiento predictivo en una de las tres líneas flexibles de mecanizado de culatas con las que se cuenta. Los profesionales encargados del mantenimiento de las líneas desempeñan la importante tarea de asegurar el correcto estado de los equipos. El sistema de mantenimiento se encuentra en constante mejora debido a la importancia del mismo para garantizar la calidad y la cadencia de producción.

Las acciones de **mantenimiento** se clasifican en tres familias según la naturaleza de las mismas: correctivo, preventivo y predictivo o condicional. El mantenimiento correctivo tiene lugar cuando se detecta algún fallo en un elemento, son acciones que el equipo necesita inesperadamente. El mantenimiento preventivo sigue un plan en el que se realizan acciones periódicamente siguiendo datos de ciclo de vida de los elementos y recomendaciones del proveedor del equipo. El mantenimiento predictivo, en cambio, se lleva a cabo cuando se informa por parte de diversos sensores de que el deterioro del equipo es alarmante. La finalidad última del



mantenimiento predictivo es reducir la falta de valor añadido ligada al mantenimiento preventivo y al correctivo, conociendo con anticipación el momento esperable de fallo en el elemento.

El punto de mantenimiento es el momento en el que se lleva a cabo una determinada acción sobre un elemento a fin de mantenerlo en su correcto estado de funcionamiento. La implementación del mantenimiento predictivo tiene como fin suministrar información sobre el estado del ciclo de vida de los elementos para que el punto de mantenimiento sea el idóneo, reduciendo así los gastos que supone el mantenimiento excesivo y sobre todo evitando el fallo imprevisto del elemento.

El mantenimiento predictivo o condicional forma parte de un conjunto de técnicas que, en los próximos años, harán que las fábricas sean gestionadas de una manera completamente distinta a los métodos actuales. En la industria actual se están desarrollando una serie de técnicas que hace unos años resultaban impensables y ahora resultan asumibles gracias al avance digital y al consecuente abaratamiento de los dispositivos electrónicos. Técnicas que van a suponer la cuarta revolución en los procesos industriales, basadas en las nuevas posibilidades de almacenamiento y transmisión de datos. La industria 4.0 trata de trasladar estas tecnologías al mundo de las plantas de fabricación, de manera que se cuente con una inmensa cantidad de datos al servicio del proceso industrial.

Las revoluciones industriales (ilustración 2) vienen siempre motivadas por un gran adelanto en la tecnología que supone un avance muy notorio en las factorías. La primera revolución industrial tuvo lugar a partir del año 1784 motivada por la aplicación de la energía producida por la **máquina de vapor**. El siguiente gran cambio se produjo con la industrialización que supuso la **producción a gran escala en cadena** en torno a 1870, influenciado en gran medida por el aprovechamiento de la energía eléctrica. El último adelanto que había tenido efectos considerados como revolución industrial fue el desarrollo de la electrónica alrededor de 1969 que permitió la **automatización de las líneas** de producción reduciendo el esfuerzo físico de las actividades manuales y aumentando aún más la cadencia de producción. Hasta la actualidad estos habían sido los grandes avances en la historia de la industria, pero la revolución digital de las **telecomunicaciones** y del procesamiento de datos en la que vivimos está produciendo una cuarta revolución que debe suponer la diferencia de las empresas con sus competidores.

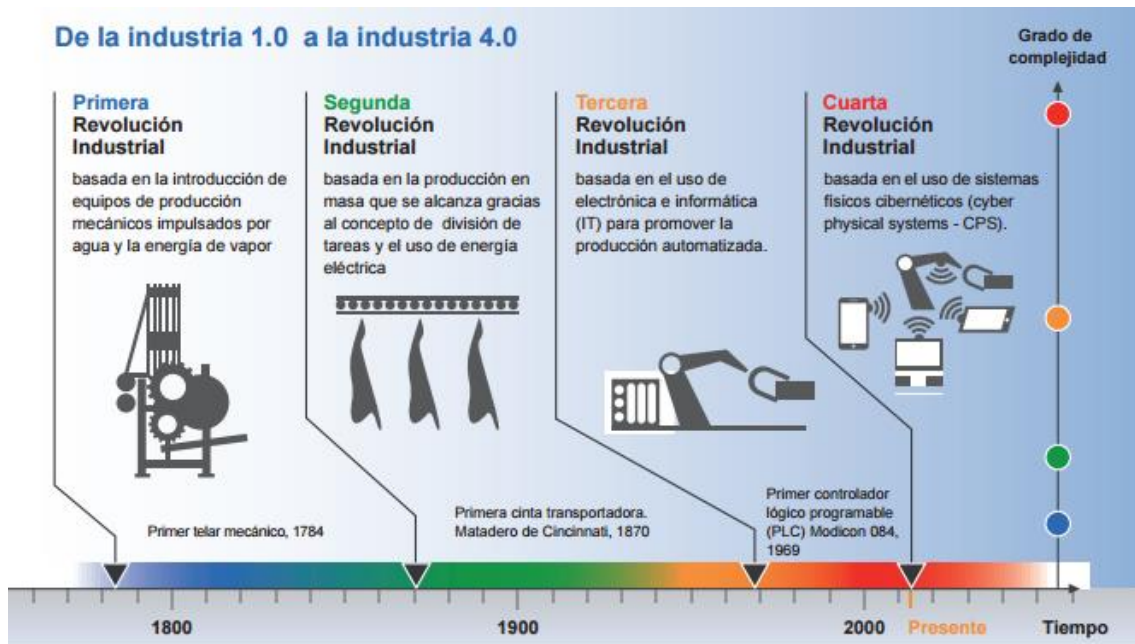


Ilustración 2 Evolución temporal de la industria

El trabajo descrito constituye uno de las vertientes de mayor aplicabilidad de la conectividad en las industrias. Basándose en la captación y transmisión de medidas se desea contar con una base de datos actualizada que proporcione información certera sobre el estado de deterioro de los equipos utilizados en las líneas de producción.

ALCANCE



Alcance

Este trabajo pretende diseñar un sistema conjunto de mantenimiento predictivo para una línea de mecanizado de culatas para motores de automóviles.

Existen unas determinadas magnitudes que están relacionadas con el estado del ciclo de vida de los elementos. Lo ideal es conocer los valores de dichas magnitudes en los elementos de los equipos que se desea evitar que lleguen a la rotura. De esta manera se podrían realizar las acciones de mantenimiento correspondientes en el momento adecuado en base a la evolución del ciclo del elemento. El objetivo principal del mantenimiento predictivo es conocer la evolución del rendimiento de operación de los elementos en base a su ciclo de vida y así elegir el momento preciso en el que se debe llevar a cabo el ajuste necesario.

Con la implantación de este plan de mantenimiento predictivo o condicional, se pretende mejorar la capacidad de la planta para detectar los posibles fallos que puedan surgir en sus equipos. Cuando un fallo en un elemento se detecta con la suficiente anticipación para corregirlo, se consiguen evitar las consecuencias que acarrearía dicho problema.

Imagínese una planta completa en la que se conociese el estado del ciclo de vida de cada uno de los elementos de cada máquina. En dicho modelo ideal no se producirían fallos imprevistos en los elementos jamás, ya que se conocería esa situación con antelación al fallo. Se sabría cuando el elemento necesita un ajuste, y el personal de mantenimiento especificaría si se realiza alguna acción o, por el contrario, se lleva el elemento a fin de ciclo. El mayor problema de las líneas automatizadas actuales, en materia de mantenimiento, es el desconocimiento del estado real de los equipos. Se cuenta con datos históricos y mediciones fiables de muchos elementos. Sin embargo, para optimizar el proceso productivo se requiere información en tiempo real e histórica del estado de muchos más elementos de las instalaciones.

Se pretende que la base teórica aquí expuesta sirva para el lanzamiento del sistema predictivo y que tras el análisis de los datos obtenidos se comiencen a tomar acertadas decisiones de mantenimiento que aumenten la competitividad de la línea de producción.

OBJETIVOS



Objetivos

El objetivo de este proyecto es diseñar la implementación de un sistema coordinado de **mantenimiento predictivo** en los equipos de una de las líneas de mecanizado de culatas de la factoría. Se trata de una línea de tipo flexible que ha sido instalada recientemente debido a la creciente demanda de producto. En cada uno de los equipos de la línea existen unas magnitudes susceptibles a ser medidas para verificar el estado de los componentes del equipo. Estas mediciones actualmente se realizan visualmente por un operario, conductor de la línea, a medida que recorre los equipos. En concreto las mediciones de los índices de vibración, temperaturas y parámetros máquina resultan útiles en la predicción de fallos. El propósito es que esos datos se traduzcan en valores digitales y se monitoricen conjuntamente en una pantalla de control de toda la línea. En resumen, se pretende que desde un ordenador se reciban las señales de cada equipo de la línea, y se muestren los valores en tiempo real y la evolución histórica de los mismos en el tiempo. De esta manera, mediante el estudio de los datos visualizados en el monitor se puedan tomar decisiones de mantenimiento con gran precisión.

El desarrollo de las tecnologías de captación, transmisión y procesamiento de datos eliminan casi por completo las limitaciones que hasta hace poco hacían impensables este tipo de controles. El primer paso es contar con unos sensores capaces de medir las magnitudes que se desean en cada caso. El siguiente punto es ser capaces de transmitir esos datos en tiempo real al punto de control. Por último, analizar los datos que se reciben y almacenarlos para tener una visión histórica del sistema. En base al análisis realizado, se deben tomar decisiones y llevar a cabo las pertinentes acciones de mantenimiento.

La cantidad de magnitudes que se pueden medir dentro de un proceso productivo es inmensa. Sin embargo, la prioridad viene regida por el impacto del fallo de los elementos controlados por cada una de esas magnitudes sobre la calidad en la producción. Una vez determinadas las características a controlar, debe comenzar su estudio para la instalación de los sensores adecuados.

La trazabilidad de los productos es la información relativa a las transformaciones que han sufrido en su proceso de fabricación. La trazabilidad junto con la información temporal del estado de los equipos hacen que las industrias 4.0 sean capaces de analizar exhaustivamente las causas de los defectos de calidad que se detecten en los productos. Al recibir una reclamación del cliente sobre un producto, poder determinar la causa del defecto. Así, conociendo las causas de defectos poder eliminarlos de raíz y reducir el porcentaje de piezas defectuosas producidas.

La transición de las empresas hacia la industria 4.0 es un paso obligado para poder competir en el mercado actual. En las líneas de producción automatizadas, la reducción de los costes de mantenimiento es una de las estrategias principales para mejorar la competitividad de la planta.

PARTE I: ESTUDIO PREVIO



En esta primera parte se van a introducir los conceptos básicos del producto fabricado en esta factoría, los motores para vehículos. También se describirán de manera general sus componentes más destacados.

Además se relatarán los procesos de mecanizado de los componentes de forma prismática: culata y bloque motor. Detallando las operaciones que sufren las culatas durante su proceso de fabricación, ya que en su línea de mecanizado se estudiará la implementación de alguna de las tecnologías de predicción de fallos disponibles en el mercado.

Cabe destacar que la utilización del mantenimiento predictivo en los equipos industriales no está acotado a los procesos de la industria automovilística. Ni siquiera está limitado a los procesos de mecanizado. Toda instalación, equipo o maquinaria es susceptible a ser provista con determinados sensores que midan y envíen datos sobre las magnitudes convenientes. Según el elemento que se desee controlar las magnitudes ligadas a su estado de deterioro serán unas u otras.

Lo más importante en el mantenimiento predictivo es descubrir las magnitudes que están relacionadas con el estado del elemento. Una vez determinadas, el mercado tecnológico ofrece innumerables soluciones para cada propósito. Está claro que la rentabilidad de la inversión determinará la elección de la tecnología a aplicar.

CAPÍTULO 1: EL MOTOR DE COMBUSTIÓN Y SUS COMPONENTES



Capítulo 1:

El motor de combustión y sus componentes

Los vehículos son alimentados por la potencia suministrada por su **motor térmico**, gracias a la reacción exotérmica de combustión de combustible (gasolina o gasoil) en presencia del comburente (oxígeno del aire atmosférico). Para que esta reacción comunique una potencia mecánica suficiente tiene que llevarse a cabo a unas condiciones concretas de manera que se produzca una combustión explosiva e instantánea. Se aprovecha directamente la energía química almacenada en el combustible transformándola en energía mecánica que desplaza el pistón linealmente. Una serie de elementos comunican este movimiento a las ruedas del vehículo que rotan desplazándolo.

En este texto se van a describir los elementos que conforman un motor de gasolina. Caracterizados por la pulverización de la gasolina desde la bomba de inyección en el tubo de aspiración de aire (colector de admisión) y se prende en el cilindro gracias al encendido de las bujías. En el caso de los motores alimentados con gasoil, la mayor diferencia reside en que no se cuenta con carburador ni dispositivo de encendido. A los cilindros entra solo aire y en el momento oportuno se inyecta en ellos el gasoil que se quema sin necesidad de chispa eléctrica. En los modelos actuales de motores de gasolina se viene inyectando el combustible directamente a los cilindros, lo cual mejora el rendimiento y reduce las emisiones.

El motor funciona gracias al ciclo termodinámico de cuatro tiempos (**Ciclo de Otto**) que se produce en el interior de los cilindros que componen el bloque motor. Se divide en cuatro etapas distintas (ilustración 3) que se repiten periódicamente cada vez que el cigüeñal da dos vueltas completas.

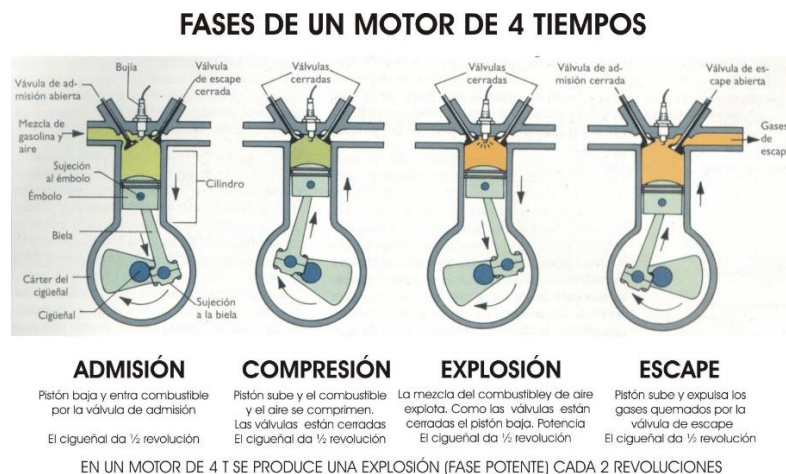


Ilustración 3 Ciclo de Otto

La primera etapa es la admisión de la mezcla de aire y gasolina; el pistón desciende y la válvula de admisión se abre hasta que el émbolo alcanza el punto muerto inferior. En el segundo ciclo el pistón sube hasta el punto muerto superior con ambas válvulas

(admisión y escape) cerradas comprimiendo la mezcla. En la etapa de explosión la bujía enciende la mezcla en su punto de máxima compresión inflamándola; la fuerza hace que el pistón descienda hasta el punto muerto inferior. El cuarto escenario del ciclo es el escape de los humos residuales de la combustión, la válvula de escape se abre y el émbolo asciende expulsando los gases al exterior.

Para que la reacción de combustión se produzca de la manera descrita y la energía cinética lineal se transmita en forma de rotación intervienen una serie de componentes fijos y móviles (ilustración 4).

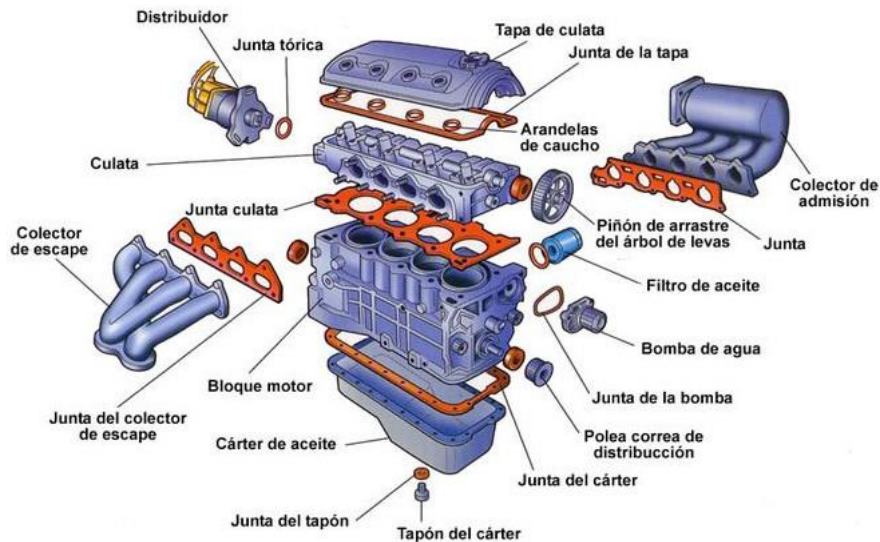


Ilustración 4 Despiece de motor de 4 cilindros en línea

El **bloque motor de cilindros o cárter superior** (ilustración 5) sirve de apoyo a los cilindros y encierra los demás elementos del motor evitando la incursión de partículas externas. Sobre él se monta la culata, y por su parte inferior está unido a la altura del cigüeñal el cárter inferior. Suele ser de fundición o de aleación de aluminio (más ligera). El cárter inferior constituye el depósito del aceite y aloja la bomba de engrase, cuenta con un respiradero que lo comunica con el aire libre.



Ilustración 5 Bloque motor

La **culata** (ilustración 6) aloja las válvulas de admisión y escape, los colectores de admisión y escape de aire, además de los elementos de encendido en el caso de los motores de gasolina. Forma un conjunto estanco con el bloque motor, sobre el cual se apoya. Entre la cara superior del bloque motor y la inferior de la culata se interpone una junta que impermeabiliza la unión, los defectos en estas caras de contacto provocarán fugas de gases y agua de refrigeración. El diseño del colector de admisión de aire es un punto clave ya que su longitud y diámetro interior influirán en la pérdida de carga que sufra el aire hasta su llegada a los cilindros.



Ilustración 6 Culata

Los **pistones** (ilustración 7) reciben la presión originada en la combustión sobre su cara superior. Tienen una pared delgada lateral de forma cilíndrica con un orificio que lo atraviesa, en el que se aloja el bulón que sujeta el pie de la biela correspondiente. Para ajustar la estanqueidad de la cámara de combustión se colocan, en unas gargantas del pistón, unos aros elásticos de fundición de diámetro ligeramente superior al del pistón. Obsérvese que si no existiese holgura entre el pistón y el cilindro del bloque motor, el rozamiento provocado por el desplazamiento vertical del mismo sería muy fuerte.

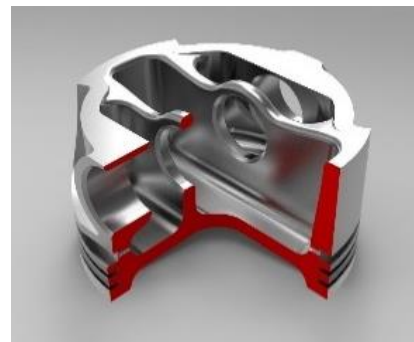
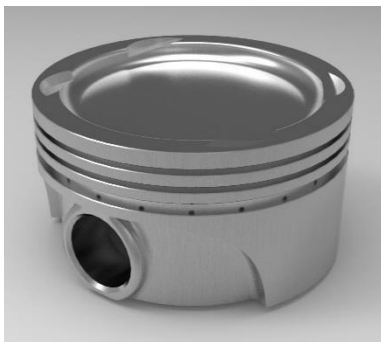


Ilustración 7 Pistones

Las **bielas** (ilustración 8) son piezas que conectan los pistones por sus bulones con los codos del cigüeñal. Se divide en tres partes: pie, cuerpo y cabeza. La cabeza y el pie han de estar perfectamente alineados para evitar vibraciones en la carrera del pistón. El pie de la biela es su parte superior, con el orificio pequeño abraza al bulón. La cabeza gira sobre el codo del cigüeñal, está dividida en dos partes desmontables sujetas por espárragos.



Ilustración 8 Biela

El **cigüeñal** o árbol motor (ilustración 9) recibe por parte de las bielas insertadas en sus codos los impulsos de los correspondientes pistones y los transmite con su propia rotación. Gira apoyado sobre cojinetes unidos al cárter superior. Como el cigüeñal recibe varios impulsos en cada vuelta, violentos y localizados en alguno de sus codos (dependiendo de la configuración del motor), resulta ser una de las piezas del motor más solicitadas mecánicamente, sufriendo flexión y torsión. Además, debe transmitir toda la potencia generada al automóvil. Los modelos modernos son huecos para aligerar el peso del mismo.

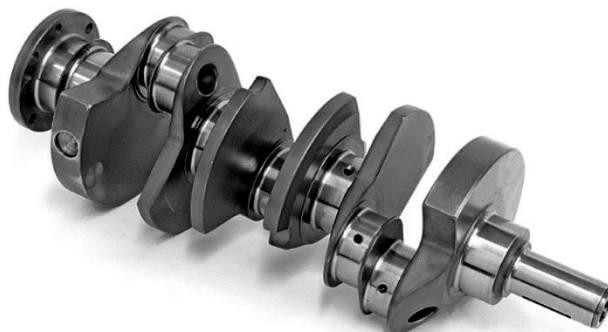


Ilustración 9 Cigüeñal

El **volante** (ilustración 10) regulariza el movimiento del motor acumulando la inercia del movimiento rotativo. Es una rueda pesada de fundición o acero montada en un extremo del cigüeñal. El impulso producido por la explosión de una de las cámaras de combustión genera el giro del eje del cigüeñal. Pero esta energía no es constante, sigue un ciclo de cuatro etapas en la que solamente una de ellas produce energía. Según el número de cilindros del motor y la disposición de los mismos esta energía total recibida en el eje será más o menos constante. La función del volante de inercia es acumular la energía y aportarla de tal manera que la potencia del motor sea lo más uniforme posible.



Ilustración 10 Volante de inercia

CAPÍTULO 2: EL PROCESO DE FABRICACIÓN DE LA CULATA Y EL BLOQUE MOTOR



Capítulo 2:

El proceso de fabricación de la culata y el bloque motor

Se van a describir los procesos de mecanizado de las dos piezas de mayor tamaño que conforman el motor: la culata y el bloque. En su proceso de fabricación, se alimenta a las líneas con unas piezas brutas de aluminio procedentes de fundición. La elección del aluminio frente al acero viene justificada por el menor peso de las piezas fabricadas por el primer material. La culata y el bloque motor brutos se asemejan ambos a un paralelepípedo.

Los procesos industriales de mecanizado se suelen dividir en dos partes: desbaste y acabado. Ya se ha comentado que el mecanizado consiste en un arranque de material, en este caso viruta metálica, de una pieza bruta para conseguir una geometría concreta y precisa en el producto final. La primera fase de desbaste sirve para que las dimensiones se acerquen mucho a las cotas deseadas, es en la que se retira más material de la pieza, sus herramientas tienen que ser más resistentes y lógicamente la cantidad de viruta producida es mayor. En el acabado final se consiguen las exigencias superficiales del producto. En los casos estudiados las zonas por las que se desplazan los órganos móviles del motor han de tener un acabado muy bueno para minimizar el rozamiento. Además la cara de contacto común entre la culata y el cárter debe tener una perfecta planitud para asegurar la estanqueidad de los cilindros.

Mecanizado del bloque motor.

En el proceso de mecanizado del cárter superior se deben trabajar las seis caras laterales en varias fases, teniendo especial atención en las zonas más críticas como los alojamientos para los pistones o el apoyo del cigüeñal.

En una primera fase conocida como “desnudo” sucesivas operaciones en centros de mecanizado transforman las seis caras laterales eliminando material pero sin conseguir un acabado superficial de alta calidad.

A continuación se mecaniza la cara inferior del bloque. Sobre esta cara va a montarse el **cigüeñal** sujeto por sus apoyos (ilustración 11). El cigüeñal gira, sobre unos cojinetes, gracias a la energía que le transmiten las bielas. Como en toda zona de apoyo para elementos que giran a gran velocidad, el acabado superficial y las tolerancias dimensionales son muy estrictos. Por ello la importancia de esta operación de acabado sobre la cara inferior.

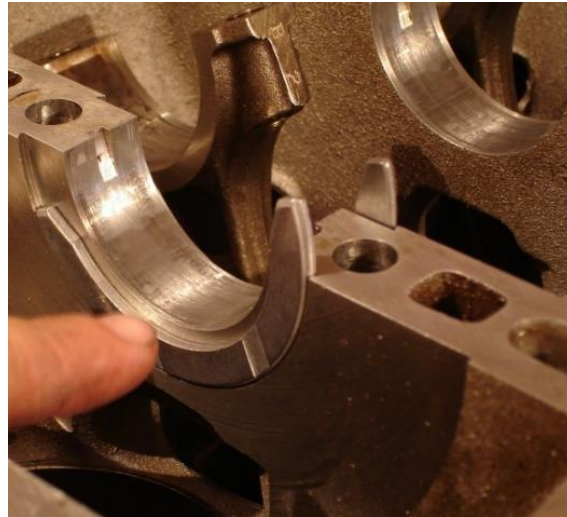


Ilustración 11 Apoyos para el cigüeñal

El siguiente proceso atañe a las camisas en la que se van a alojar los pistones (ilustración 12). Los pistones se van a encontrar realizando un movimiento vertical ascendente y descendente a gran velocidad, así que el acabado debe ser bueno también en esta parte. En una primera fase se realiza un mandrinado, se mecanizan los agujeros que ya trae el cárter de la fundición para ajustar sus dimensiones a un valor próximo al final y reducir su rugosidad superficial.



Ilustración 12 Mecanizado de las camisas para pistones

En un segundo paso, se procede al bruñido y lapeado de las camisas de los cilindros. Con el bruñido se alcanza una calidad de acabado muy alta, además de mejorarse la geometría cilíndrica necesaria. El lapeado, por otra parte, disminuye la rugosidad superficial mejorando el acabado final por abrasión del material.

Por último, se trabaja en una lavadora con agua a muy alta presión (300bar) para eliminar las rebabas del mecanizado que pudieran obstaculizar el circuito de aceite.

Mecanizado de la culata.

En el proceso de mecanizado de la culata se deben trabajar las seis caras laterales, los múltiples orificios que la misma presenta y las zonas relacionadas con el sistema de válvulas.

Todas las caras, salvo la inferior, son mecanizadas en dos fases; una primera de desbaste y un mecanizado final de acabado.

Las caras anterior y posterior reciben el primer piñón de los árboles de levas (recibe movimiento del cigueñal) y el último (transmite movimiento para impulsar la bomba de engrase).

Sobre las dos caras longitudinales se acoplan los **colectores de admisión y escape** respectivamente. Los colectores de admisión suelen fabricarse de aluminio (ilustración 13), su función es alimentar de aire a las cámaras de combustión. Se muestra un colector de admisión destinado a alimentar un motor de cuatro cilindros.



Ilustración 13 Colector de admisión

Por otra parte, los colectores de escape (ilustración 14) se posicionarán en la cara opuesta de la culata. Se suelen fabricar de acero, ya que deben soportar las elevadas temperaturas que alcanzan los gases de escape (500°C).



Ilustración 14 Colector de escape

Destacar que las superficies de apoyo de ambos colectores en la culata necesitan un buen acabado. Así, al montar los colectores con sus respectivas juntas, la

estanqueidad quede asegurada. La fuga de gases provoca una importante pérdida de potencia en el motor.

La **cara inferior** de la culata se monta sobre el cárter (ilustración 15). Entre ellos se coloca una junta de estanqueidad que sella la unión de las caras mecanizadas, impidiendo la fuga de los gases de combustión y del fluido refrigerante. El mecanizado (fresado) de esta cara es un punto clave del proceso, ya que se requiere un perfecto acople de la superficie con la cara superior del cárter. Los comentarios acerca del defecto en las superficies de apoyo de los colectores, también son aplicables a esta cara. Con el hándicap de que la superficie de la cara superior es mucho más extensa que los apoyos de los colectores.



Ilustración 15 Cara inferior de la culata

Además, se debe mecanizar específicamente la **zona de las guías y los asientos**. En la ilustración 16 se muestra la zona en la que apoya la válvula cuando está cerrada, llamada asiento. En realidad, las guías son cuerpos cilíndricos por los que se conduce a la válvula en su recorrido. No obstante, en este caso se denota como mecanizado de guías al tratamiento de la superficie sobre la que se insertan las guías y no al objeto insertado. El acabado de estas superficies influye drásticamente en el consumo de combustible y el rendimiento del motor.

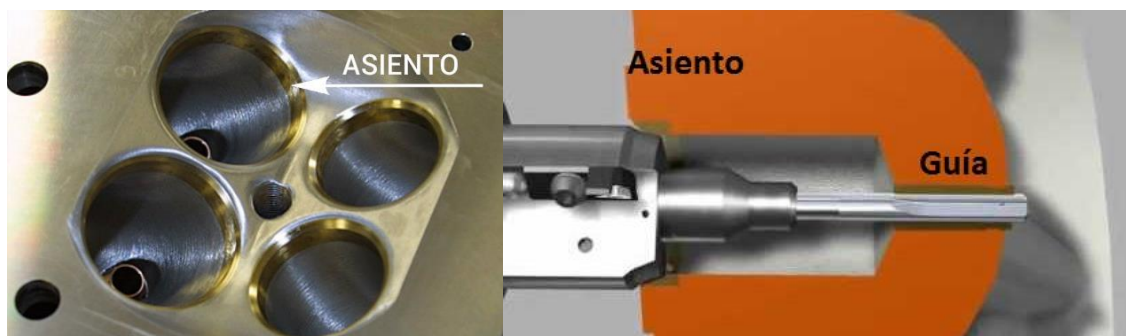


Ilustración 16 Detalle de zona de guías y asientos

Por último, destacar la importancia del acabado de las superficies de apoyo del **árbol de levas**. El árbol de levas gira sobre unos cojinetes insertados en la cara superior de la culata y coordina mecánicamente la apertura o cierre de las válvulas por medio de los empujadores desplazados por las levas. En motores con configuración DOHC

(Double OverHead Cam) se cuenta con dos árboles de levas; uno girando sobre las válvulas de admisión y el otro sobre las de escape. Las posibles holguras en los apoyos del árbol son una de las principales fuentes de averías del mismo.

CAPÍTULO 3: DESCRIPCIÓN DE LÍNEA DE MECANIZADO DE CULATAS



Una línea de producción de culatas se encarga de transformar el producto bruto proveniente de la fundición en el producto final listo para ser montado en el conjunto motor. El material que se viene utilizando mayormente en la fabricación de culatas es el aluminio fundido. No obstante, también se pueden fabricar culatas de fundición de acero. La elección del aluminio está motivada por la necesidad de reducir el peso del motor de los vehículos y así reducir el consumo y las emisiones.

En una línea de fabricación de culatas se cuenta con operaciones de mecanizado, de limpieza y de montaje. En cuanto a la implantación de las tecnologías de mantenimiento predictivo, se han de priorizar en las operaciones de mecanizado sobre el resto. Los fallos inesperados que pueden surgir en los centros de mecanizado tienen una influencia mucho mayor en la calidad del producto final, en comparación con los que puedan surgir en los demás equipos de la línea. Es decir, la detección precoz de los fallos en centros de mecanizado, tiene una rentabilidad económica mayor que en el resto de equipos. Los centros de mecanizado modernos son máquinas en las que se montan las herramientas necesarias sobre un eje movido por un husillo motorizado, con el avance de las herramientas rotando en varias posiciones se realizan las operaciones de arranque de viruta sobre las piezas. Los centros de mecanizado trabajan de manera automática bajo CNC (Computer Numerical Control), su potencia consumida nominal ronda los 75kW y alcanzan velocidades de 20.000 rpm dependiendo del modelo y la aplicación en cuestión.

Se describe a continuación la línea de mecanizado de culatas en la que se desean instalar los primeros equipos de análisis predictivo de la factoría. En el capítulo anterior se han tratado los puntos más importantes del proceso de mecanizado, a continuación se describirá la distribución de la línea con todas las operaciones que constituyen el proceso de transformación de la culata.

Las culatas brutas proveniente de la fundición de aluminio se **cargan** de manera automática a las cintas transportadoras de la línea. Las cintas transportadoras se encargan de transportar las culatas entre operaciones sobre rodillos, se encuentran a la altura de la cintura aproximadamente. No existe ningún punto de stock intermedio a lo largo de la línea. Los únicos puntos de extracción de piezas están destinados a sacar piezas para realizar mediciones de cotas e inspecciones visuales, habitualmente tras cambiar herramienta que ha llegado a su fin de ciclo por herramienta reglada.

Las culatas brutas se **atornillan** sobre unas bases de acero, denominadas adaptadores. Esto facilita su transporte y sujeción en los centros de mecanizado a la hora de trabajar. A cada una de las culatas se le realiza un **marcado** Datamatrix que permite identificarla a lo largo de todo su ciclo de vida (ilustración 17).

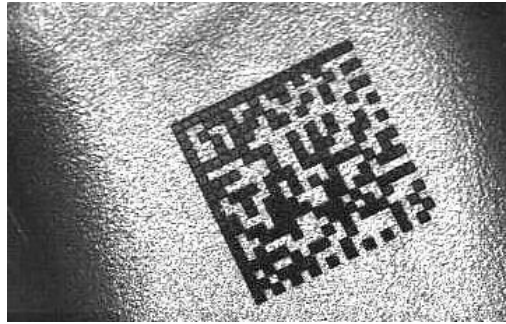


Ilustración 17 Marcado Datamatrix

A continuación comienza el tramo que comprende todas las acciones de **mecanizado** sobre las distintas caras de la culata. Que tienen lugar en varias operaciones de mecanizado que tienen lugar en centros con doble electrohusillo (ilustración 18 e ilustración 19). La ventaja que tienen los centros de mecanizado con doble husillo es que permiten trabajar con dos culatas simultáneamente reduciendo a la mitad el tiempo de ciclo. Cada uno de los electrohusillos trabaja con la herramienta correspondiente sobre una de las culatas montadas en la cámara de mecanizado. Se refrigera el punto de corte con fluido que a su vez facilita el desalojo de la viruta formada. Multitud de estudios se realizan para controlar la producción de viruta, sus dimensiones y su evacuación por las canalizaciones.

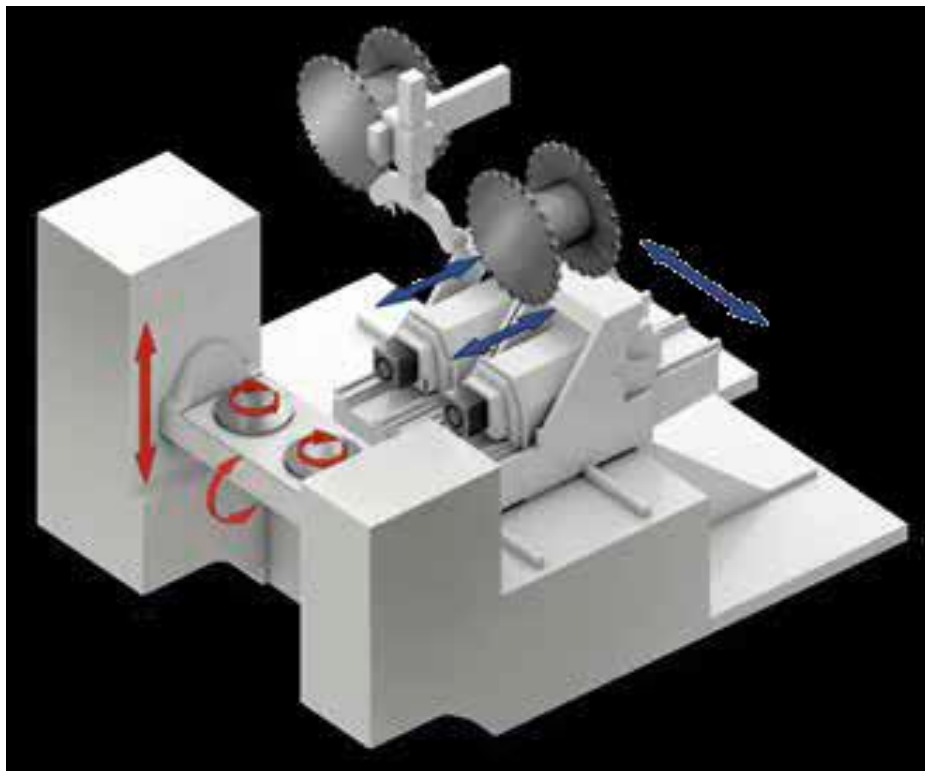


Ilustración 18 Esquema de centro de mecanizado de doble electrohusillo



Ilustración 19 Centro de mecanizado

Entre las operaciones de mecanizado se encuentran dos fases de montaje. El ensamble de las guías y los asientos (ilustración 20) y el atornillado de las tapetas que sujetarán el árbol de levas cuando se monte sobre la culata. Etapas ambas automatizadas.



Ilustración 20 Detalle de válvula con su guía y su asiento

El mecanizado produce virutas de aluminio por el corte de la herramienta sobre la superficie bruta. Los regados de líquido refrigerante contribuyen a la limpieza de esa viruta, pero para garantizar la calidad de la siguiente operación se lavan las piezas en grandes lavadoras industriales a alta presión. Se cuenta con tres de estas lavadoras distribuidas entre las operaciones de mecanizado de las líneas. Las lavadoras tienen dos zonas diferenciadas a las que se trabaja con agua a baja y alta presión (350bar). En el interior de las cámaras de la lavadora existen brazos robóticos que pulverizan agua a presión desplazándose a gran velocidad por las superficies de las piezas. El cometido de las lavadoras es eliminar todo posible resto de viruta en la pieza, acción que compromete la calidad de la siguiente operación de mecanizado. Además, hay una segunda función que es eliminar las rebabas que se

forman en el mecanizado. Las rebabas son superficies que sobresalen fruto del arranque de viruta en esa dirección. Para su eliminación se emplea la limpieza a alta presión denominada desbarbado.

Las últimas operaciones atañen a diversos montajes: bolas, tapones, copelas y semiconos. Estas máquinas no van a influir demasiado en el proyecto porque no procede realizarles mantenimiento condicional más allá del control térmico de sus componentes eléctricos. Se engloban todas en una zona de montaje completamente automatizada y alimentada por unos depósitos vibradores con tolva. Las bolas y tapones cumplen la función de distribuir adecuadamente el flujo de refrigerante por sus conductos y bloquear sus salidas. Por otra parte, las copelas y los semiconos (ilustración 21) sujetan el muelle rodeando a la válvula, permitiendo que la fuerza ejercida por el resorte sea recibida por el cuerpo cilíndrico.

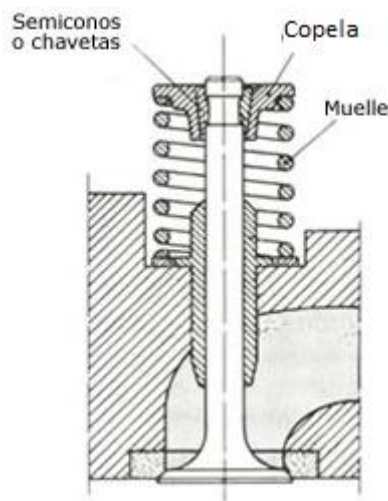


Ilustración 21 Detalle de montaje de válvula

Por último, se cuenta con los controles de calidad del producto terminado que se realizan al 100% de las culatas fabricadas en la línea. Se controla el correcto ensamble de las copelas y la estanqueidad de los circuitos de refrigeración y lubricación. Esta estanqueidad se comprueba midiendo el flujo de aire que se “escapa” cuando se aporta por la entrada del circuito aire a muy alta presión. La cantidad de aire que se puede escapar es un límite muy restrictivo que asegura el óptimo funcionamiento de las culatas. Una pequeña fuga de fluido en alguno de los circuitos tendría consecuencias fatales sobre la potencia y durabilidad del motor.

PARTE II: IMPLEMENTACIÓN



En esta segunda parte se van a describir los aspectos que atañen propiamente al sistema de mantenimiento predictivo a diseñar. Puesto que ya se conocen las actividades desarrolladas en la línea de producción, se va a proceder a describir los elementos principales de los equipos que conforman esta línea. Una vez presentados los elementos, se detallarán las técnicas de mantenimiento predictivo aplicables de manera general, y su implantación en los equipos de la línea de mecanizado. Por último, se describe el beneficio esperable del funcionamiento coordinado del sistema en su conjunto. Justificando de esta manera la inversión en su implantación. Además se resume el modo de funcionamiento del plan de mantenimiento predictivo propuesto.

CAPÍTULO 4: ELEMENTOS DE EQUIPOS CONTROLADOS



Un paso clave a la hora de decidir estudiar la implementación del mantenimiento predictivo es el estudio de los equipos concretos de la línea productiva sobre los que se desea desarrollar el plan. Una línea cuenta con numerosos equipos de diversa naturaleza y en un primer plan de mantenimiento predictivo no se puede tratar de abarcar toda la extensión por motivos económicos. Por ello, resulta indispensable acotar la zona de estudio. Una vez que se consiga llevar a cabo la implementación en la zona acotada, en base a los resultados obtenidos se decidirá si la expansión a las demás líneas es recomendable o no. La línea en la que se va a comenzar la implementación del mantenimiento predictivo es una de las líneas de fabricación de culatas, en concreto la instalada más recientemente.

Anteriormente, se han dividido los equipos de la línea atendiendo a las tareas que realizan en: equipos de mecanizado, equipos de lavado y equipos de montaje. Las labores de mantenimiento predictivo van a ser más intensas en los equipos de mecanizado, esta decisión viene justificada por la mayor complejidad y coste de mantenimiento de estos equipos. Los equipos de lavado y montaje van a desempeñar un papel secundario en este primer plan de mantenimiento condicional de la línea. Lo cual no quiere decir que no se puedan estudiar con más precisión en futuras inversiones.

La intención de este plan es controlar los cuadros eléctricos, los electromotores y los parámetros máquina más importantes de la línea. Los cuadros eléctricos están presentes en todos los equipos de la línea. Sin embargo, los electromotores solo se encuentran en los centros de mecanizado y los parámetros máquina que se desean controlar atañen a los centros de mecanizado y a las lavadoras.

Los **cuadros eléctricos** son placas sobre las que están montados los circuitos que interconectan los diversos elementos eléctricos de los equipos. Cada cuadro eléctrico se encuentra encerrado en el interior de un armario. Cada máquina cuenta con su propio cuadro eléctrico específico. Los elementos de transporte, tales como caminos de rodillos, también cuentan con su propio cuadro eléctrico. Cada cuadro eléctrico cuenta con unos elementos concretos dependiendo de la naturaleza de la máquina a la que se alimenta, no obstante la tipología de los elementos es muy repetitiva. Salvo excepciones, los elementos presentes en cada cuadro suelen ser similares y es posible agrupar todos los dispositivos en unas pocas categorías: cableado de contactores magnetotérmicos, fuente de alimentación, PLC/Carta E-S/Interface, variador de motor, controlador esfuerzo-recorrido, filtro variador, bobina SELF, arrancador bomba, conmutador bomba... Además, cada armario eléctrico cuenta con un sistema propio de ventilación que consiste en una rejilla que permite el flujo de aire con el exterior y un grupo de frío encargado de mantener el interior a una temperatura adecuada.

Los **electrohusillos** son los dispositivos que se encargan del avance y rotación de las herramientas de arranque de viruta en los centros de mecanizado. Es el elemento clave y crucial del funcionamiento de los centros de mecanizado. Son elementos

complejos también conocidos como electrobrochas, término derivado del francés *electrobroché*. El avance del husillo se produce gracias a la potencia aportada por el motor eléctrico. En su extremo sujeta la herramienta pertinente mientras se realizan las operaciones de mecanizado sobre el producto. El avance tecnológico que han experimentado estos equipos permite reducir los tiempos de mecanizado, realizar complejas acciones y obtener buenos acabados superficiales de manera automatizada por CNC. Existen multitud de fabricantes de maquinaria de este tipo, este estudio se va a focalizar en los centros de mecanizado de la mencionada línea de culatas.

Finalmente, los **parámetros máquina** son magnitudes medibles que arrojan información del modo funcionamiento de los equipos; son ejemplos de parámetros máquina las fuerzas de bridaje de los electrohusillos y de las herramientas en los centros de mecanizado o las presiones de fluido en las lavadoras. En cada equipo hay unas lecturas que se relacionan con el estado de degradación de los elementos intervinientes. La medición de dichos valores aporta una valiosa información utilizada a la hora de tomar decisiones de mantenimiento. Estos parámetros máquina están identificados y son conocidos, habitualmente el acceso a los mismos se realiza visualmente en aparatos de medida incorporados a la máquina. El valor numérico que alcanzan estas mediciones debe mantenerse en un rango para garantizar el correcto funcionamiento del equipo. Cuando uno de los parámetros no se encuentra dentro del intervalo estipulado, se realizan inspecciones para determinar la causa de dicha desviación o incluso acciones de mantenimiento.

El desarrollo de las tecnologías de mantenimiento predictivo y la experiencia en detección precoz de fallos impulsará a la ampliación del perímetro controlado. Incluso provocando la adición de otros parámetros relacionados con desgaste de los elementos en el plan de medición de magnitudes. Algunos fabricantes ya incorporan en sus máquinas sensores de medición en tiempo real de parámetros indicadores del estado de degradación.



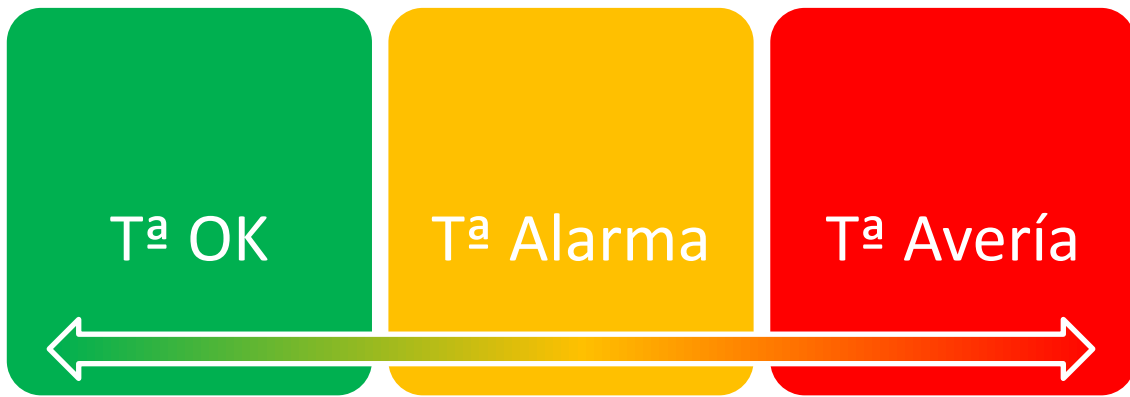
CAPÍTULO 5: CONTROL TÉRMICO



El **control térmico** de las instalaciones de la línea consiste en realizar mediciones acerca de la temperatura alcanzada en los elementos que conforman los cuadros eléctricos que alimentan a cada máquina. Cuando la corriente fluye a través de un circuito eléctrico, inevitablemente, parte de la energía eléctrica se convierte en térmica ($Q=R \cdot I^2$). Sin embargo, si existe una resistencia anormalmente alta en el circuito o se produce un flujo de corriente excesivamente alto, generándose un calor extra, lo cual supone pérdidas, daños potenciales y un funcionamiento anómalo. Los conductores con insuficiente sección para la corriente que los atraviesa, las conexiones sueltas o los flujos excesivos de corriente pueden provocar un calentamiento anómalo no deseado que provoca que los circuitos eléctricos se calienten peligrosamente.

El análisis se basa en realizar la medición del valor máximo que alcanza la temperatura de cada determinado elemento y su comparación con respecto al valor recomendado por el fabricante. El fabricante del producto recomienda una temperatura óptima de funcionamiento del elemento, garantizando su rendimiento adecuado en el entorno de dicho valor. Se define un valor de alarma ligeramente superior a la temperatura óptima recomendada por el fabricante, y un valor de avería ligeramente superior al valor de alarma. La determinación de estos valores se realiza en base a la experiencia de los técnicos de mantenimiento de las instalaciones o en base a las especificaciones del proveedor. En la documentación provista por los fabricantes de módulos eléctricos se encuentra la temperatura máxima recomendada para obtener el rendimiento 100% del producto. Incluso, en ocasiones, se adjunta la gráfica o función de la pérdida de rendimiento con temperatura. La pérdida de rendimiento ilustra el porcentaje de energía eléctrica que se disipa en forma de calor al ambiente. Es necesario contrastar la información proporcionada por el fabricante con la experiencia, ya que con frecuencia los límites fijados por el fabricante resultan demasiado restrictivos.

A medida que la temperatura de un elemento aumenta, su estado va desplazándose por los tramos del intervalo: OK, alarma y avería. Cada elemento del cuadro eléctrico tiene su propio estado según la temperatura máxima que alcanza en cada instante. En base al código de colores se visualiza rápida e intuitivamente el estado de los elementos.



Se debe tener en cuenta que la dimensión de la línea es relativamente extensa y que el número de cuadros eléctricos es elevado, además cada cuadro eléctrico cuenta con varios elementos a medir. Como consecuencia, el número de lecturas de temperatura a lo largo de una línea es inmenso y se requiere un sistema de recogida de datos específico. Para medir la temperatura de los diversos elementos de un cuadro eléctrico se suele emplear una cámara de infrarrojos que proporciona una imagen con la información de la temperatura de cada punto capturado. Es necesario que estas mediciones se realicen con el equipo en su estado de carga habitual, para obtener valores realistas de funcionamiento.

Los tipos de **elementos** que se pueden encontrar en los cuadros eléctricos de los armarios de la línea de mecanizado de culatas sobre la que se está trabajando son los siguientes:

- Módulo de potencia: son dispositivos electrónicos que se emplean para controlar voltajes y tensiones adecuándolos a su aplicación concreta. El fabricante, Siemens, recomienda que no se sobrepasen 40°C generalmente.
- Motores eléctricos: son los elementos que transforman la energía eléctrica aportada en energía mecánica lineal o rotativa. Son elementos claves en el trabajo de los equipos. No se sitúan en el armario eléctrico, sino que suele ser necesario acceder al compartimento de mecanizado para medir su temperatura. Su límite de operación suele ser 45°C por lo general.
- Grupos hidráulicos: son las bombas encargadas de impulsar la alimentación de refrigerante a la máquina. No se recomienda que superen los 50°C.
- PLC (Programmable Logic Controller) (ilustración 22): es un equipo encargado de regir el funcionamiento en tiempo real del proceso productivo en base a unas variables de entrada y unas funciones lógicas programadas. El fabricante, Siemens, recomienda no sobrepasar 60°C en montajes horizontales, y 40°C en montajes verticales.



Ilustración 22 PLC SIEMENS S7-300

- Fuente de alimentación (ilustración 23): transforma la tensión de alimentación alterna monofásica 230Vac a una tensión de 24Vdc en corriente continua para alimentar los módulos electrónicos. El fabricante, Siemens, recomienda que no se sobrepasen 60°C, en la mayoría de sus modelos aunque alguno puede llegar a los 75°C sin problema.



Ilustración 23 Fuente de alimentación SIEMENS SITOP

- Contactor (ilustración 24): es un dispositivo que conecta o desconecta un circuito eléctrico de potencia accionado mediante otro circuito eléctrico pero de potencia mucho menor. En general, es recomendable no superar 75°C en ellos. Aunque conviene repasar casos en los que el fabricante proponga un límite térmico más restrictivo.



Ilustración 24 Contactor SIEMENS Sirius

- Interruptores magnetotérmicos (ilustración 25): interrumpe la corriente cuando sobrepasa un valor específico. En general, es recomendable no

superar 75°C en ellos. Aunque conviene repasar casos en los que el fabricante proponga un límite térmico más restrictivo.



Ilustración 25 Interruptor magnetotérmico Schneider

- **Cableado general:** la norma UNE-HD 60364-5-52:2014 establece unos límites orientativos basados en el material aislante térmico del cableado, se visualizan en la ilustración 26. Sin embargo, se debe prestar atención a las diversas excepciones que puedan darse en nuestra instalación.

Tabla 52-A
Temperaturas máximas de funcionamiento según los tipos de aislamiento

| Tipo de aislamiento | Límite de temperatura (véase nota 1) °C |
|--|--|
| Poli(cloruro de vinilo) (PVC) | Conductor: 70 |
| Polietileno reticulado (XLPE) y goma o caucho de etileno-propileno (EPR) | Conductor: 90 |
| Mineral (con cubierta de PVC o desnudo y accesible) | Cubierta: 70 |
| Mineral (desnudo e inaccesible y no en contacto con materiales combustibles) | Cubierta: 105 (véase nota 2) |
| NOTA 1 – Las temperaturas máximas admisibles para los conductores dadas en la tabla 52-A y sobre las que se basan los valores de las tablas 52-C1 a 52-C4 y 52-C9 a 52-C12, han sido tomadas de las Normas IEC 60502: 1983 y IEC 60702: 1981 y se muestran en esas tablas. | |
| NOTA 2 – Cuando un conductor funciona a una temperatura superior a 70 °C, se debe asegurar que los equipos conectados a este conductor son adecuados para la temperatura resultante en la conexión. | |
| NOTA 3 – Para algunos tipos de cable, temperaturas de funcionamiento más elevadas pueden ser admitidas según las temperaturas asignadas del cable, sus terminaciones, las condiciones ambientales y otras influencias externas. | |

Ilustración 26 Extracción de norma UNE-HD 60364-5-52:2014

Los **problemas** que producen los aumentos en la temperatura de los elementos eléctricos de los cuadros eléctricos son bastante repetitivos y comunes en la mayoría de los casos.

- **Mal contacto (ilustración 27):** el conexionado de alguno de los bornes de los cables se ha aflojado y se produce calor debido al flujo de corriente a través de un contacto con alta resistencia. Se suele producir en los contactos de conmutadores y conectores. Para distinguir este fallo del sobrecalentamiento del elemento completo, se debe prestar atención a la zona caliente. Un problema de contacto se halla localizado en un extremo del cableado no en el elemento completo. La acción de mantenimiento se realiza en ese mismo momento y consiste en apretar el borne correctamente. Se muestra un controlador de un motor eléctrico con una de sus conexiones suelta.

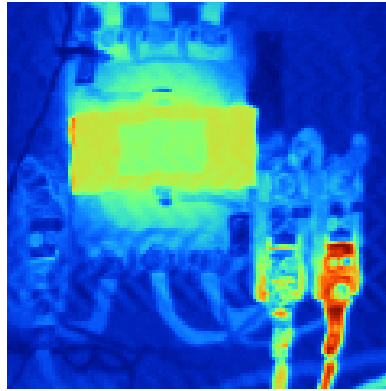


Ilustración 27 Termografía (defecto de mal contacto)

- Elemento de potencia (ilustración 28): se produce sobrecalentamiento en alguno de los elementos. La acción de mantenimiento pertinente consiste en cambiar el componente por uno nuevo. En caso de que el problema estuviera causado por la circulación de una corriente superior a la esperada por dicho elemento, se deben estudiar el motivo de esa demanda de potencia excesiva por parte de la máquina. Si el sobrecalentamiento se debe a la pérdida de aislamiento del elemento, se debe revisar si el dimensionamiento del mismo es adecuado con la corriente que se espera que lo atraviese en el funcionamiento típico de la máquina. Este tipo de defectos supone la mayor parte de los fallos detectados mediante el análisis térmico (63%). Se muestra un grupo de interruptores disyuntores sobrecargados.

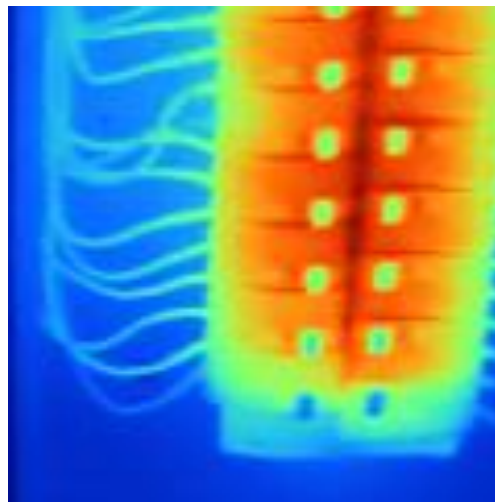


Ilustración 28 Termografía a elementos de potencia

- Climatizador (ilustración 29): el grupo de frío que se encarga de refrigerar el ambiente del armario eléctrico no funciona correctamente. Se debe revisar la operación de dicho climatizador y realizar la pertinente acción de mantenimiento sobre dicho equipo.



Ilustración 29 Climatizador de armario eléctrico

- Armario eléctrico: la obstrucción del orificio de entrada y salida de aire del armario o el posible defecto en su junta de estanqueidad provocan que el alojamiento del cuadro eléctrico no se encuentre a la temperatura deseada. La revisión de la abertura de aire y la estanqueidad del armario corrigen este problema.

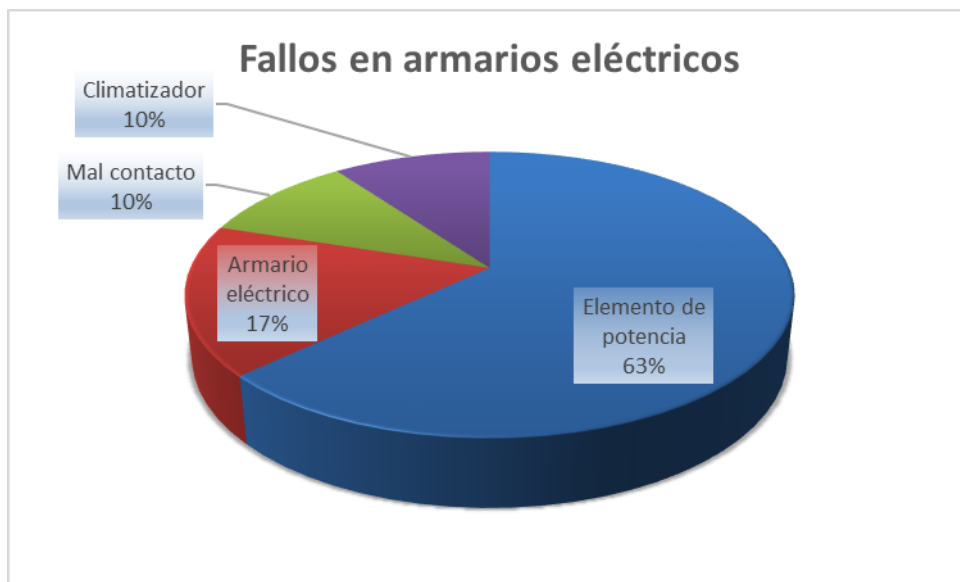


Ilustración 30 Distribución de causas de defectos en elementos eléctricos

CAPÍTULO 6: CONTROL VIBRATORIO



La **vibración** se refiere en este campo al movimiento de vaivén de una máquina o elemento de ella en cualquier dirección desde su posición de equilibrio. La causa de dicha vibración habitualmente reside en problemas mecánicos como: desequilibrio de elementos rotativos, desalineación en acoplamientos, desgaste de engranajes, deterioro de rodamientos, fuerzas aerodinámicas o hidráulicas o problemas eléctricos. Las características más importantes a estudiar de la vibración son: frecuencia, desplazamiento (mm), velocidad (mm/s), aceleración ($g=9.81m/s^2$) y *spike energy* (energía de impulsos). Los diferentes problemas son detectados por las frecuencias iguales a la velocidad de giro o bien múltiplos suyos. Cada tipo de problema muestra una frecuencia de vibración distinta.

La **amplitud** de la vibración está relacionada con la gravedad del problema, esto da una idea de la condición de la máquina. La severidad de la vibración es indicada de una forma más precisa midiendo la velocidad, aceleración o desplazamiento según el intervalo de frecuencias entre la que tiene lugar. Así para bajas frecuencias, por debajo de 600rpm, se toman medidas de desplazamiento. En el intervalo entre 600 y 60 000rpm, se mide la velocidad. Y para altas frecuencias, mayores a 60 000rpm, se toman aceleraciones. El *spike energy* o energía de impulsos proporciona información importante a la hora de detectar engranajes o rodamientos defectuosos. Para determinar la naturaleza del posible problema se debe estudiar la gráfica que representa la amplitud de las vibraciones con la frecuencia, una vez identificado el problema ya se puede visualizar la evolución de la amplitud de vibración a una determinada frecuencia a lo largo del tiempo.

La **severidad** de vibración indica la gravedad que puede tener un defecto, pero es difícil establecer valores límites de la vibración que detecten un fallo. La finalidad del análisis vibratorio es recibir un aviso con suficiente tiempo para analizar las causas y forma de resolver el problema ocasionando el paro mínimo posible en la máquina. Una vez obtenido un histórico de datos de cada elemento de las máquinas que se estudian, el valor medio representa el funcionamiento normal. Desviaciones continuas o excesivas indicarán un posible fallo que será identificado teniendo en cuenta la frecuencia a la que se producen las mayores vibraciones. Un defecto puede localizarse al comparar las amplitudes de las vibraciones tomadas. Normalmente una máquina que funciona correctamente tiene valores que suelen seguir una línea con tendencia ligeramente ascendente o constante. Cuando en algún momento los valores aumentan o la tendencia asciende de una forma inesperada, se puede pensar en la presencia de algún problema. Generalmente, la máxima amplitud de vibración se da en el punto en el que se localiza el problema. Aunque el análisis de las gráficas puede indicar el tipo de defecto existente, muy pocas veces aparecen problemas únicos y por tanto los espectros donde se refleja un defecto claramente individual. La experiencia, el conocimiento de la máquina, la comparación con otras máquinas similares y la información provista por el fabricante son factores clave a la hora de identificar la causa que produce una vibración importante.

Se va a relatar la manera de identificar los problemas más comunes analizando los datos y espectros de vibraciones.

El **desequilibrado** de rotores es una de las causas más probable de que exista vibración en las máquinas, en casi todos los elementos resulta sencillo encontrar un pico en el gráfico de representación de la amplitud frente a la frecuencia (ilustración 31) que denote un pequeño desequilibrio. Un desequilibrio provoca un pico de amplitud a la frecuencia que corresponde con la velocidad angular del eje del elemento. La gravedad del desequilibrio es proporcional a la amplitud de la vibración. Aunque, cuando aparece un pico a la frecuencia de giro, el desequilibrio no es la única causa posible de fallo.

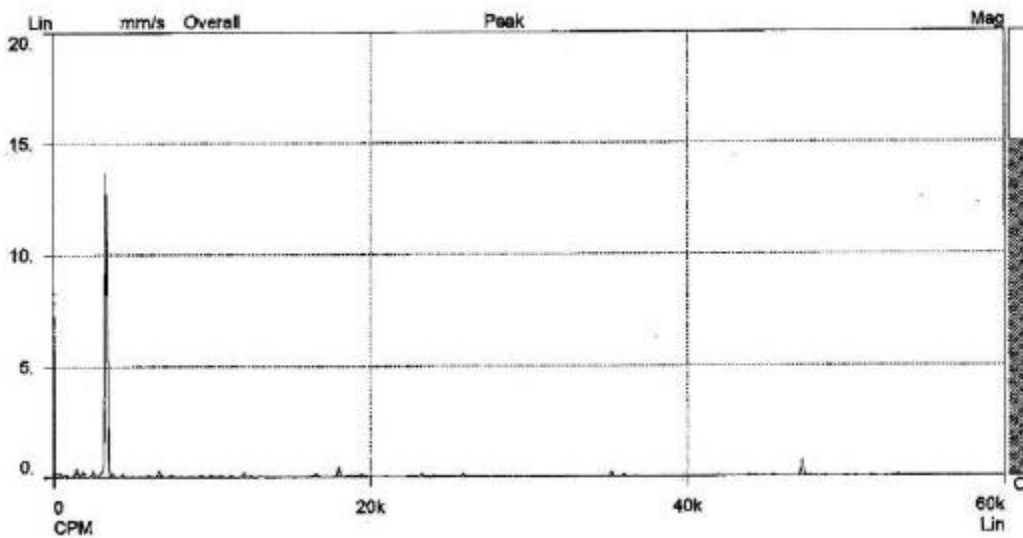


Ilustración 31 Defecto de desequilibrio, velocidad (mm/s) frente a frecuencia (rpm)

La **desalineación** de ejes es un problema muy común debido a la dificultad que supone alinear dos ejes y sus rodamientos de manera que no se originen fuerzas que produzcan vibraciones. Para reconocer una vibración debida a una desalineación en la gráfica se pueden ver picos a frecuencias iguales a la velocidad de giro del eje (ilustración 32), incluso a frecuencias el doble o triple de la velocidad de giro en el caso de que el problema sea grave. Existen tres tipos básicos de desalineación: paralelo, angular y mixto. En el caso de falta de alineación en paralelo se produce sobre todo vibración radial con una frecuencia igual al doble de la velocidad de giro del eje. Por otra parte, la falta de alineación angular provoca vibraciones en la dirección axial de los dos ejes a la velocidad de giro del eje. La acción de mantenimiento que soluciona este fallo consiste en recolocar posicionalmente los ejes rotativos, corrigiendo la linealidad en el acoplamiento.

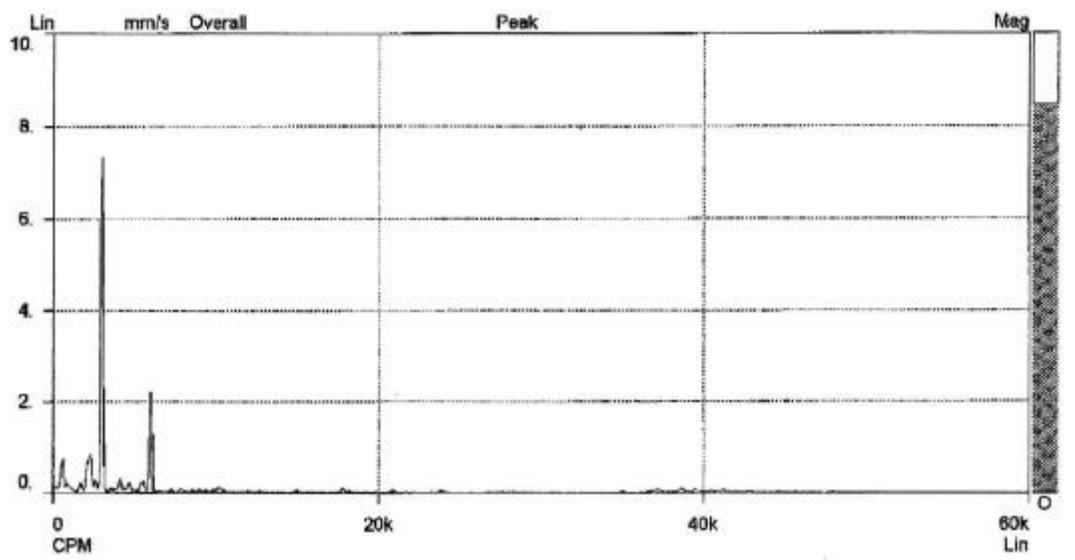


Ilustración 32 Defecto de desalineación, velocidad (mm/s) frente a frecuencia (rpm)

Los defectos en **engranajes** se observan al encontrar picos en frecuencias que coinciden con múltiplos enteros de la velocidad de giro del engranaje que falla (ilustración 33), además existirán vibraciones de amplitud menor de forma simétrica a la frecuencia del engranaje. Los problemas que surgen en los engranajes que se detectan con el seguimiento de esta vibración son el desgaste excesivo de los dientes, inexactitud de los dientes, fallo de lubricación o presencia de elementos extraños entre dientes. Estas vibraciones producidas por defectos en engranajes pueden ser detectadas en varios puntos de las máquinas.

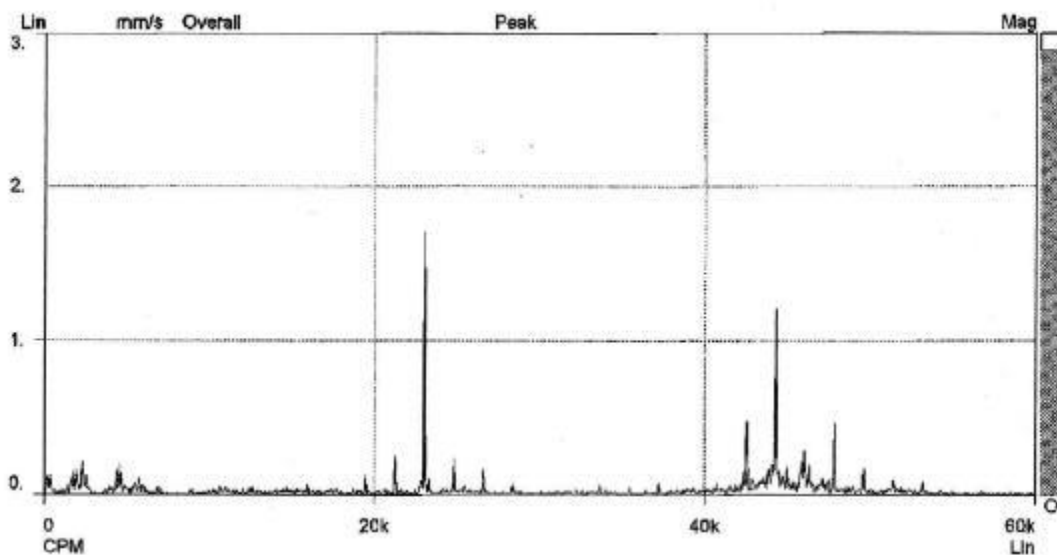


Ilustración 33 Defecto de engranajes, velocidad (mm/s) frente a frecuencia (rpm)

Por último, en los **rodamientos** se producen fallos que provocan vibraciones a frecuencias altas no relacionadas con la velocidad de rotación. El reconocimiento de este fallo resulta bastante sencillo al ver la gráfica que representa la amplitud frente a la frecuencia, ya que su característica son los numerosos picos a frecuencias altas

de amplitudes variables (ilustraciones 35 y 36). Los defectos producidos en elementos rodantes, pistas de rodamiento o jaula de retención generan fuerzas que se transmiten al alojamiento y estructura que les rodea. Se pueden producir fallos en rodamientos causados por defectos en el montaje, lubricación inadecuada, defectos de fabricación o sobrecarga de los mismos. Para identificar la zona en la que se está produciendo la mayor degradación hay que estudiar el valor de vibración alcanzado a las frecuencias calculadas en las siguientes fórmulas:

| DEFECTO | FRECUENCIA (revoluciones/minuto) |
|--------------------------------|---|
| Jaula | $\frac{1}{2} \left(1 - \frac{BD}{PD} \cdot \cos(\phi) \right) \cdot \eta$ |
| Bolas o Cilindros | $\frac{PD}{2 \cdot BD} \left(1 - \left(\frac{BD}{PD} \right)^2 \cdot \cos^2(\phi) \right) \cdot \eta$ |
| Pista de deslizamiento interna | $\frac{1}{2} \left(1 + \frac{BD}{PD} \cdot \cos(\phi) \right) \cdot n \cdot \eta$ |
| Pista de deslizamiento externa | $\frac{1}{2} \left(1 - \frac{BD}{PD} \cdot \cos(\phi) \right) \cdot n \cdot \eta$ |

Siendo:

Φ : ángulo de contacto

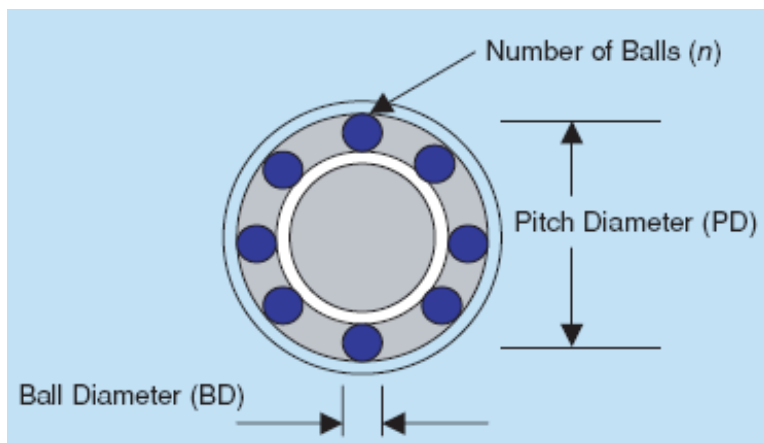


Ilustración 34 Parámetros geométricos de rodamientos para análisis vibratorio

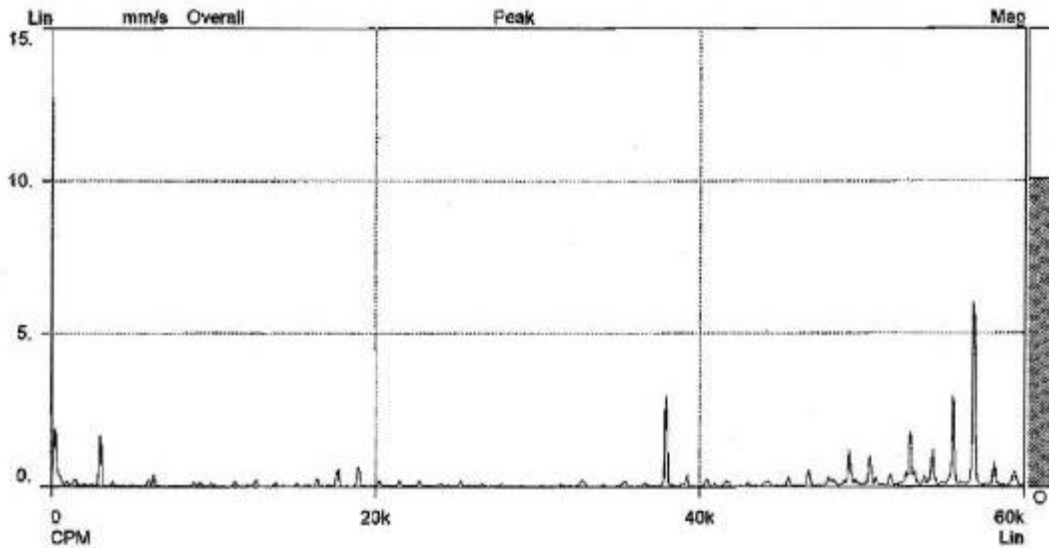


Ilustración 35 Defectos en rodamientos, velocidad (mm/s) frente a frecuencia (rpm)

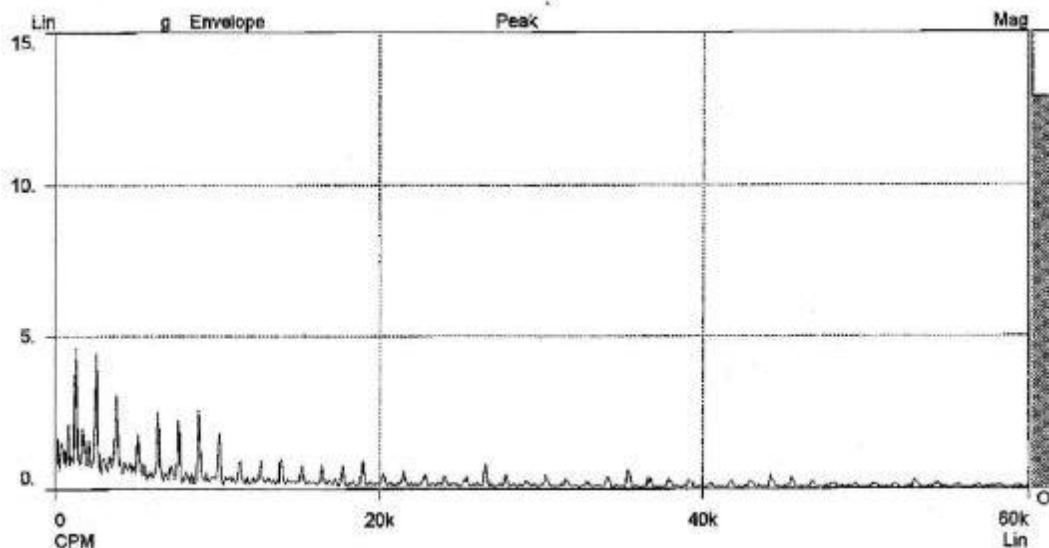


Ilustración 36 Defectos en rodamientos, aceleración (g) frente a frecuencia (rpm)

Teóricamente, cuando una máquina funciona perfectamente no se deben producir vibraciones a ninguna frecuencia. Dicha situación es ideal ya que siempre van a existir vibraciones por haber elementos móviles y holguras en los puntos de contacto. Lo importante es que las máquinas operen con el mínimo nivel de vibración posible y que un aumento en la amplitud a cierta frecuencia muestre un problema localizado con antelación al fallo del elemento. La vibración aumenta la fatiga de los elementos, causa ruidos en las factorías e incluso puede repercutir en la calidad alcanzada en los productos fabricados.

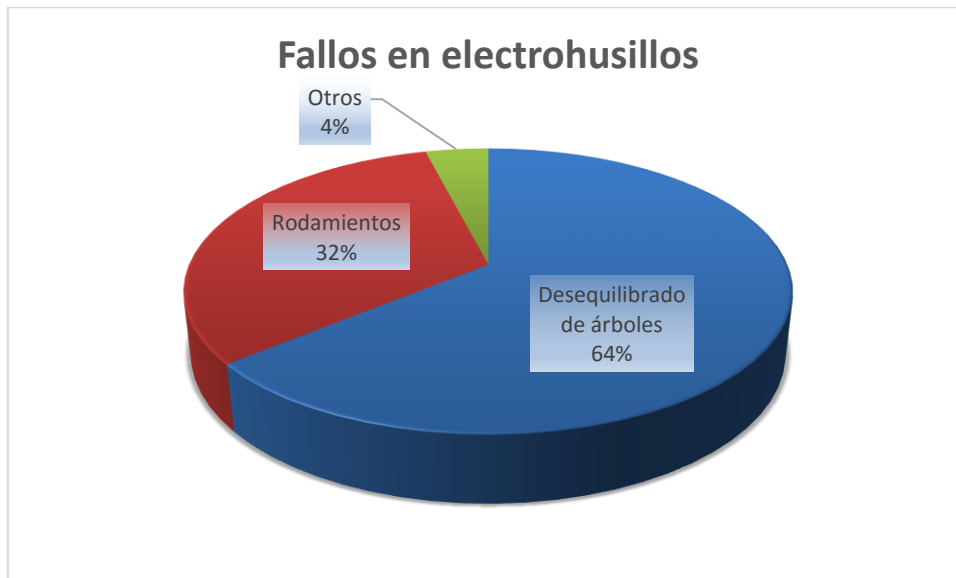


Ilustración 37 Distribución de causas de defectos en electrohusillos

CAPÍTULO 7: CONTROL DE PARÁMETROS MÁQUINA



Cada instalación cuenta con sus propios parámetros característicos indicativos, dependiendo de la naturaleza propia de la máquina. Los parámetros máquina son medidas de la operación del equipo. Son de vital importancia para detectar problemas de funcionamiento en los equipos, porque suelen estar íntimamente relacionados con el desarrollo de la función de la máquina. Por ejemplo, un parámetro máquina importante en un horno será la temperatura interior del mismo.

Según el proveedor de maquinaria y la antigüedad del equipo los medidores de estos parámetros estarán integrados de fábrica o no. Siempre resulta más cómodo que la maquinaria integre este tipo de sensores. Sin embargo, es frecuente que no se cuente con ellos de serie y se deban adquirir e instalar adicionalmente en la factoría.

Además, puede desearse medir una característica concreta que no estuviese contemplada inicialmente. La experiencia del personal de mantenimiento de las factorías aporta conocimiento acerca variables adicionales con importancia sobre el proceso productivo. Cada máquina tiene su peculiaridad y a medida que se observa su funcionamiento real en la planta se detectan posibles fallos que surgen con cierta frecuencia en la misma. Esta experiencia debe incitar a la introducción de nuevos parámetros máquina para prevenir los fallos más recurrentes y graves.

Los parámetros máquina deben mantener un valor constante durante el funcionamiento del equipo, oscilando dentro de un rango de tolerancia determinado por la repercusión de la característica controlada. Cuando el valor se dispersa fuera del rango permitido, se considera estado de avería. En este caso no tiene sentido definir valor de alarma ya que el intervalo en el que los valores tienen permitido oscilar suele ser ínfimo. El aviso de alarma no aporta tanta capacidad de anticipación como en las anteriores técnicas, en las que el deterioro se espera lento y gradual, con un amplio intervalo de alarma previo a la avería. Pueden existir características que se deseen controlar en algún equipo que deban variar según la fase del ciclo de operación de la máquina en cuestión. No obstante, este estudio solo abarca el control de parámetros cuyo valor se debe mantener constante. El modo de operación para parámetros variables requiere una sincronización de los valores de alarma-avería, que deben variar con las etapas del ciclo de funcionamiento.

Los equipos de la línea afectados por el seguimiento de parámetros se pueden dividir en: centros de mecanizado, grupos de frío y lavadoras. Ya se han mencionado anteriormente en este trabajo en la descripción de la línea de fabricación de culatas (Capítulo 3).

Los parámetros a controlar en los **centros de mecanizado** afectan al grupo neumático, al grupo hidráulico, a los regados y a los sistemas de sujeción.

- Los parámetros de **sujeción** garantizan el desarrollo adecuado posicionamiento de la pieza bruta durante los procesos de mecanizado. Se componen por las fuerzas de sujeción de las herramientas y de las piezas (ilustración 38). Las fuerzas de sujeción son ejercidas por garras neumáticas

y se controlan midiendo la presión de su circuito de alimentación de aire, con ello se sujetan las herramientas de corte en los cabezales de los electrohusillos y las piezas en la cámara de mecanizado. En el interior de algunos centros de mecanizado se cuenta con unos orificios de salida de aire posicionados en puntos sobre los que debe encontrarse la pieza sujeta en el proceso de fabricación, si los orificios están tapados por las caras de la pieza el posicionamiento es adecuado. Midiendo la presión que soporta dicho circuito de aire cuando está obstruido por una cara plana se comprueba su correcto funcionamiento. De esta manera se asegura que el posicionamiento de la pieza y de la herramienta en el proceso de mecanizado es el correcto y que no se producirán desplazamientos durante la operación.

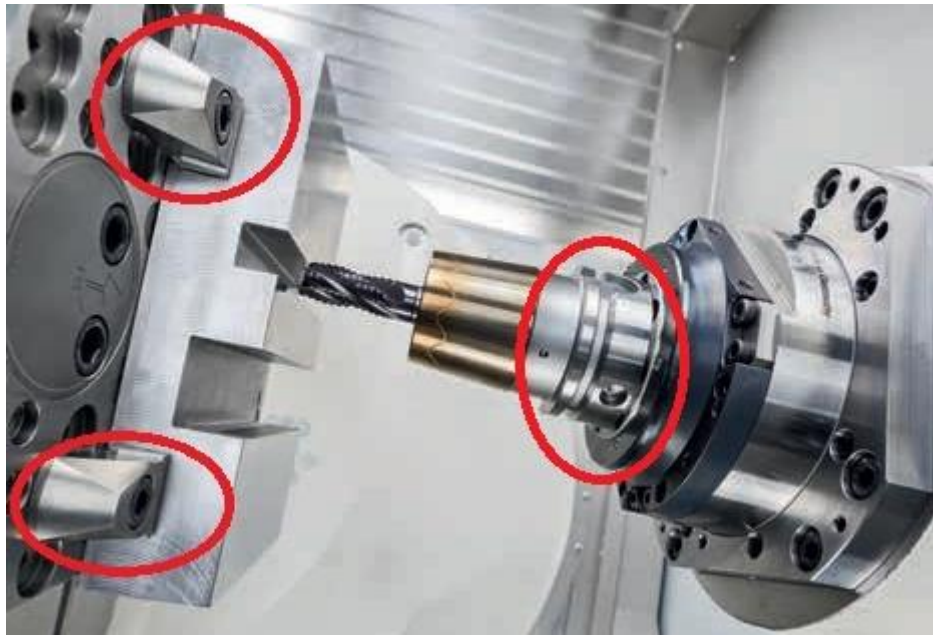


Ilustración 38 Detalle de sujeción de pieza y de herramienta

- El grupo **neumático** se encarga de la alimentación de aire comprimido desde la red hasta la máquina, requiere revisiones de los medidores de presión.
- El grupo **hidráulico** trabaja aportando los fluidos de trabajo del centro de mecanizado tales como aceites o refrigerante, requiere revisiones de los niveles de depósitos, de las medidas de presión y de la temperatura de los fluidos.
- Los **regados** son los conductos que dirigen el fluido refrigerante interviniente en el mecanizado hacia la zona adecuada. En los centros de mecanizado se cuenta con un regado interno en la herramienta de corte además de regados generales orientados en la zona de trabajo (ilustración 39). Los regados deben encontrarse sin golpes ni obstrucción.



Ilustración 39 Regado general (izquierda) y de herramienta (derecha)

En cuanto a los **grupos de frío** que se encargan de la refrigeración expresa de los armarios eléctricos tienen un único parámetro de control que es la temperatura del aire frío que liberan. Este valor debe oscilar entre un valor máximo y mínimo admisibles, que vienen determinados por las exigencias de los elementos que conforman el cuadro eléctrico alojado en el interior del armario (Capítulo 5).

Por último, los equipos de limpieza de piezas, **lavadoras**, requieren revisión de las presiones de regado y desbarbado (si se cuenta con ello). Las lavadoras utilizan agua a presión para limpiar la viruta de las piezas, regado; y para eliminar las rebabas producidas en el metal por el mecanizado, desbarbado.

Además de estas mediciones mencionadas existen otro tipo de comprobaciones sensitivas (vista, tacto...) que se realizan sobre algún equipo concreto que resultan susceptibles de realizarse por medio de algún parámetro numérico. Por ejemplo, el correcto aceitado de la zona de inserción de las guías y asientos, la posición de los asientos en la cinta alimentadora, el funcionamiento de la cámara de control de encolado o el estado de la protección anticaída del dispensador de semiconos. Estas comprobaciones sensoriales puede parecer costosa su automatización pero se debe tener constancia de ellas en el análisis de la línea.

CAPÍTULO 8: SISTEMA SOLUCIÓN PROPUESTO



Para realizar un control eficaz, automatizado y continuo de las propiedades descritas en los capítulos anteriores sobre la maquinaria se requiere un importante sistema de sensores de medida y electrónica de telecomunicaciones. La finalidad del mantenimiento predictivo no reside solo en conocer las magnitudes que se deben comprobar para predecir fallos futuros. El mantenimiento predictivo trata de aprovechar los avances tecnológicos en materia de transferencia y manejo de datos para que se reciban alertas previas al fallo en tiempo real. Y gracias a estas alertas, el personal de mantenimiento industrial pueda programar las acciones que se consideren en cada caso para realizarlas en el momento más conveniente. De esta manera se busca principalmente evitar la parada no programada, imprevista, de la maquinaria. El mantenimiento predictivo pretende tener datos con los que poder conocer el estado de los equipos de la factoría y en base a ello observar la evolución del ciclo de vida de los elementos, anticipándose al defecto en los mismos (ilustración 40).

Cuando se detectan los defectos que surgen con el uso de los equipos, se recibe la señal de alarma y se programa una intervención de mantenimiento. Al realizar la intervención se corrige la inminente avería, así se evitan defectos de calidad en el producto final. Resulta clave la capacidad para predecir una avería antes de que esta tenga lugar, y conocer también la causa raíz del problema para actuar sobre ella en el futuro.

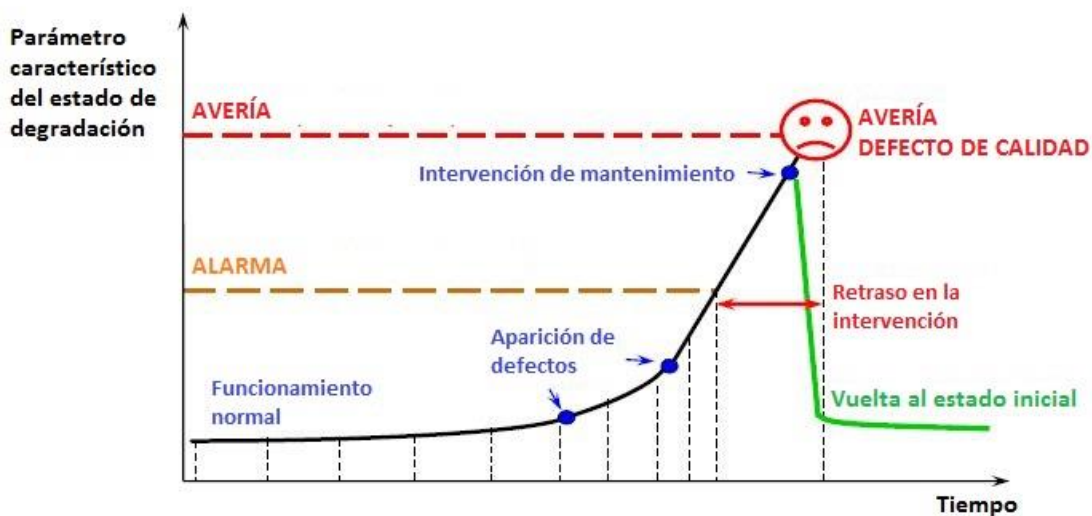
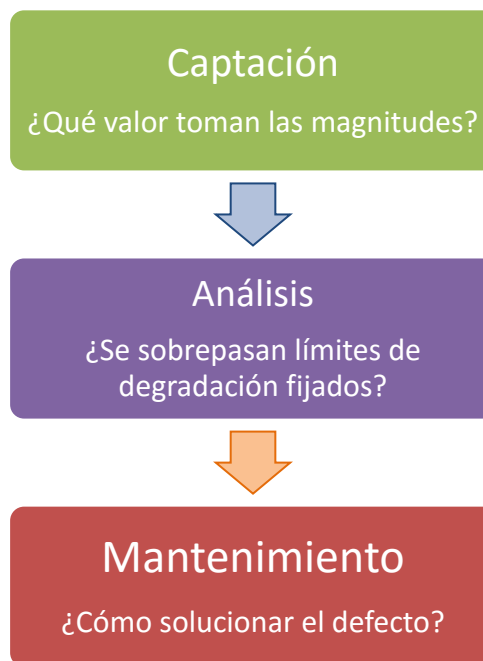


Ilustración 40 Evolución típica del estado de degradación

Un robusto plan de mantenimiento predictivo consta de tres etapas: captación de datos, análisis de datos y decisión de acción de mantenimiento. Todas las etapas son importantes para llevar a cabo una implementación eficaz de las técnicas descritas.

- La captación de datos alude a la manera de medir y almacenar los valores de las magnitudes que se han determinado relacionados con el estado de deterioro de los elementos.

- El análisis de los datos corresponde a la manera de procesar los datos obtenidos de manera visual, para poder observarlos y trabajar sobre ellos a fin de determinar si existe riesgo de fallo en algún caso. El estudio de la evolución de las magnitudes con el tiempo debe permitir prever las averías futuras, para facilitar esta tarea la presentación de gráficos temporales y señalizaciones de alarmas es muy útil.
- La decisión acerca de la pertinente acción de mantenimiento se debe tomar tras el estudio de los datos recogidos, en base a la experiencia y a las indicaciones del proveedor del equipo. Consiste en buscar y erradicar la raíz del fallo que ha sido predicho.



La **captación de datos** se realiza idealmente de manera automática gracias a la instalación de los sensores concretos para medir cada magnitud. Con sensores conectados a red se transmiten los valores medidos en todos los equipos de la línea en tiempo real al equipo de control. Hasta el equipo de control llegan todos los datos de temperatura, vibración y parámetros máquina. Esto requiere una elevada inversión en sensores de todo tipo para cada uno de los equipos, pero resultaría la solución óptima desde el punto de vista del rendimiento. La opción más rentable económicamente, a corto y medio plazo es la recogida de datos periódica por parte de un empleado siguiendo una ruta establecida por la línea. En esta segunda opción no se obtienen los datos en tiempo real, pero se obtienen mediciones puntuales que pueden resultar suficientes para detectar problemas futuros. Es necesario diferenciar la captación de datos de los tres tipos descritos: temperatura, vibración y parámetros máquina.

- **Temperatura:** la alternativa más empleada para la medición de la temperatura de distintos elementos eléctricos es la captura de termografías con una cámara de infrarrojos. Este equipo permite visualizar una carta de la imagen tomada con niveles de color para cada temperatura superficial existente. Son equipos que se manejan por un operario que realiza un recorrido por los armarios de la línea anotando los valores de temperatura máximos medidos que se alcanzan en cada uno de los elementos de cada cuadro eléctrico. La cámara tiene una precisión mayor de medida de temperatura en su punto central, por ello es recomendable que se apunte el objetivo al elemento sobre el que se desee medir en cada caso. Esta tarea se automatizaría, eliminando el no-valor-añadido ligado al desplazamiento de un operario por la línea, monitorizando las temperaturas de los elementos y enviándolas vía Wi-Fi al ordenador de control. Cada cámara termográfica de infrarrojos del fabricante FLUKE (ilustración 41), modelo TiS20, supone una inversión que ronda los 1500€. Este modelo tiene una precisión relativa del 2%, un rango de medida entre -20°C y $+350^{\circ}\text{C}$, con un campo de visión de $35^{\circ}7'0'' \times 26^{\circ}8'0''$. El modelo cumple con los requisitos técnicos que requiere esta aplicación. El período de captación de datos para cada armario debería ser de dos o tres meses como mínimo, para tener una idea suficientemente real del estado de los cuadros eléctricos.



Ilustración 41 Cámara de infrarrojos

- **Vibración:** existen varios tipos de sensores para medir las vibraciones de los elementos. Para el caso de utilización estudiado, electro husillos de centros de mecanizado, el dispositivo más recomendado es el acelerómetro. Los acelerómetros más empleados están constituidos por un cristal piezoeléctrico que convierte la energía mecánica del movimiento en señales eléctricas, abarcan un rango de frecuencias de 1 a 10000Hz. Los datos que se capturan por el acelerómetro han de ser compilados por un microprocesador compatible y posteriormente enviados al ordenador de control. Los centros de mecanizado que se vienen diseñando últimamente incorporan su propio acelerómetro y microprocesador de fábrica, debido a la modernización de la maquinaria. No obstante, estos dispositivos también se pueden instalar en cada uno de los demás centros de mecanizado para que se registren

vibraciones continuamente en tiempo real. La inversión económica que requiere un equipo constituido por un acelerómetro modelo VSA004 (214€) y un microprocesador VSE100 (697€) de la casa IFM ronda los (1000€) (ilustración 42). El acelerómetro es capaz de detectar vibraciones en el rango de aceleración entre -25 y +25g, y de frecuencia entre 0 y 10.000Hz. El elemento electrónico de diagnóstico cuenta con cuatro entradas dinámicas que permiten un conexionado máximo de cuatro acelerómetros, además de múltiples salidas, conexión Ethernet TCP/IP y memoria del histórico integrada con reloj en tiempo real. Estas características hacen que estos dispositivos sean aptos desde un punto de vista técnico para esta aplicación. En el caso de que no se disponga del presupuesto necesario para instalar un sensor en cada equipo, se puede conformar un conjunto transportable (acelerómetro + microprocesador + ordenador) con el que realizar las mediciones en cada electrohusillo. En este caso concreto, se va a trabajar sobre centros de mecanizado cuyo período de revisión recomendable es de 6 meses.



Ilustración 42 Acelerómetro y procesador

- **Parámetros máquina:** en este caso, la instrumentación requerida para automatizar la toma de datos es diversa debido al amplio abanico de parámetros existentes. La gran mayoría de los parámetros se captan realizando lecturas sobre medidores de presión, temperatura, caudal o fuerza (ilustración 43). Así que la implementación únicamente conllevaría la adquisición de los datos por medio de sensores capaces de transmitirlos por red, evitando la lectura manual de los mismos. Existen parámetros que se comprueban con más frecuencia que otros por su influencia en el desarrollo del proceso de fabricación, su automatización resulta prioritaria por ello. Además, hay controles que conllevan gran cantidad de tiempo aunque su frecuencia sea menor, este criterio también se debe tener en cuenta a la hora de priorizar.



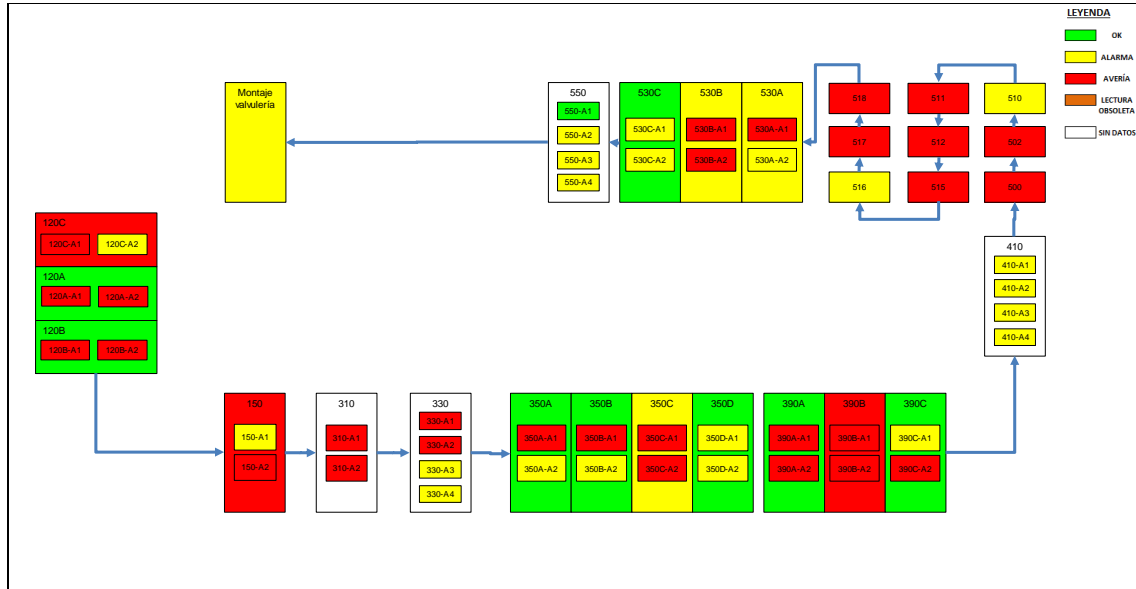
Ilustración 43 Sensores de presión, caudal y temperatura

Para el **análisis de datos** se opta por la elaboración de unas hojas de cálculo con macroinstrucciones programadas, un archivo diferente para cada técnica de mantenimiento predictivo. La finalidad es introducir los datos y obtener un plano sinóptico resumen de los equipos de la línea con un patrón de colores identificativo de su estado: OK, Alarma y Avería. En el libro de cálculo se cuenta con dos hojas diferenciadas pero relacionadas mediante algoritmos en lenguaje Visual Basic Application. La función de la primera hoja es recibir toda la información proveniente de los elementos de la línea. En ella se visualizan todos los elementos controlados de los que se van a recoger los distintos datos. Se cuenta con un registro de todos los tipos de elementos con sus respectivos límites de avería/alarma y las mediciones de los meses anteriores al actual.

| Elemento | OK < QJE | NOK > QJE | Ultima Lectura | Fecha | MAY | ABR | MAR | FEB | ENE | DIC | NOV | OCT |
|--|----------|-----------|----------------|-------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Cabl., Cont./Mag. | 75 | 90 | 93 | MAY | 93 | 91 | 95 | 91 | 75 | 74 | 72 | 71 |
| Varador SIEMENS | 40 | 60 | 40 | MAY | 40 | 36 | 35 | 37 | 39 | 20 | 58 | 35 |
| Filtro general | 60 | 85 | 59 | MAY | 59 | 74 | 60 | 93 | 88 | 82 | 55 | 88 |
| Filtro Variador | 60 | 85 | 57 | MAY | 57 | 78 | 53 | 85 | 79 | 52 | 76 | 80 |
| Bobina SELF General | 85 | 95 | 103 | MAY | 103 | 97 | 84 | 83 | 84 | 86 | 86 | 102 |
| Bobina/SELF E-Brocha | 85 | 95 | 103 | MAY | 103 | 77 | 88 | 95 | 78 | 97 | 99 | 83 |
| Cabl., Cont./Mag. | 75 | 90 | 89 | MAY | 89 | 77 | 80 | 86 | 89 | 71 | 73 | 94 |
| Fuente de Alimentacion | 60 | 89 | 81 | MAY | 81 | 58 | 86 | 84 | 81 | 67 | 65 | 62 |
| PLC/Carta E-3/Interface | 40 | 60 | 67 | MAY | 67 | 53 | 67 | 46 | 67 | 32 | 39 | 30 |
| Conexion Electrobrocha | 60 | 89 | 54 | MAY | 54 | 60 | 59 | 69 | 78 | 57 | 71 | 81 |
| Puertas... Cierre y estanquidad armarios | 1 | 0 | 1 | MAY | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Refrigeración... Ventilación armarios | 1 | 0 | 1 | MAY | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Cabl., Cont./Mag. | 75 | 90 | 68 | MAY | 68 | 78 | 88 | 80 | 99 | 66 | 86 | 78 |
| Varador SIEMENS | 40 | 60 | 35 | MAY | 35 | 67 | 50 | 35 | 33 | 30 | 46 | 43 |
| Filtro general | 60 | 85 | 92 | MAY | 92 | 89 | 63 | 82 | 89 | 86 | 79 | 93 |
| Filtro Variador | 60 | 85 | 92 | MAY | 92 | 86 | 86 | 89 | 89 | 52 | 61 | 75 |
| Bobina SELF General | 85 | 95 | 89 | MAY | 89 | 84 | 80 | 102 | 98 | 93 | 83 | 78 |
| Bobina/SELF E-Brocha | 85 | 95 | 104 | MAY | 104 | 86 | 101 | 87 | 77 | 100 | 96 | 92 |
| Cabl., Cont./Mag. | 75 | 90 | 85 | MAY | 85 | 80 | 84 | 71 | 70 | 89 | 80 | 74 |
| Fuente de Alimentacion | 60 | 89 | 69 | MAY | 69 | 63 | 86 | 82 | 63 | 90 | 75 | 86 |
| PLC/Carta E-3/Interface | 40 | 60 | 46 | MAY | 46 | 44 | 33 | 31 | 43 | 32 | 46 | 39 |

Por su parte, la segunda hoja constituye una representación gráfica de la distribución secuencial de los equipos a lo largo de la línea de producción. Este gráfico interacciona directamente con las mediciones registradas en la primera hoja, y en base a ello rellena del color conveniente cada uno de los elementos en base al estado

térmico, vibratorio o de sus parámetros. Además se cuenta con una hoja de recogida y tratamiento de anomalías en la que se observa los incidentes detectados y se anotan las acciones de mantenimiento que se decidan realizar. La función de este archivo es doble; por una parte recibe los datos que se recogen de las mediciones de temperatura de manera ordenada, y además ilustra el estado de la línea recogiendo las acciones de mantenimiento pertinentes.



Por último, la toma de **decisiones de mantenimiento** se realiza en base a lo observado en el panel sinóptico de estado de la línea. Lo primero es identificar la causa raíz del defecto detectado, para ello se deben observar los datos que se han recogido y su evolución con el tiempo. Sobre todo en los problemas vibratorios, el análisis de la evolución temporal resulta de gran utilidad. En ocasiones la identificación de la causa resulta compleja pero una vez identificada se debe programar una acción de mantenimiento para erradicarla. La acción de mantenimiento es frecuente que requiera detener la máquina para su realización, por ello conviene programar su realización para la parada programada más próxima.

| HISTORICO DE ANOMALIAS DETECTADAS | | 36 | 3 | | | | | |
|-----------------------------------|----------------|--|----------------|----------------|------------|---------------------|--------|-------------|
| PRIC | ORGANO MAQUINA | ANOMALIA DETECTADA | FECHA APERTURA | FECHA PREVISTO | FECHA REAL | ACCION REALIZADA | PILOTO | RESPONSABLE |
| 1 | 1 | Fuente de Alimentacion La lectura de la termografía tomada es de 81 °C. La T° Mínima NOK es de 80 | 5/05/17 | 10/05/17 | 10/05/17 | Reemplazar elemento | Adolfo | Roberto |
| 1 | 2 | Filtro Variador La lectura de la termografía tomada es de 82 °C. La T° Máxima OK es de 60 | 5/05/17 | | | | | |
| 1 | 1 | Bobina/s SELF E-Brocha La lectura de la termografía tomada es de 104 °C. La T° Mínima NOK es de 95 | 5/05/17 | | | | | |

Las paradas programadas son eventos periódicos que conforman el plan de mantenimiento preventivo de las líneas, se mencionarán en capítulos posteriores. Durante el tiempo estipulado para la realización de la parada programada se detiene la producción de la línea y se realizan acciones de mantenimiento sobre la maquinaria. Las acciones identificadas en el análisis predictivo se lanzan para su realización en la parada programada, evitando paradas imprevistas de la maquinaria por defectos no detectados. Para ello se utiliza el registro de anomalías de la hoja de cálculo, en la que aparecen los defectos detectados y se anotan las acciones a desarrollar y la fecha de realización.

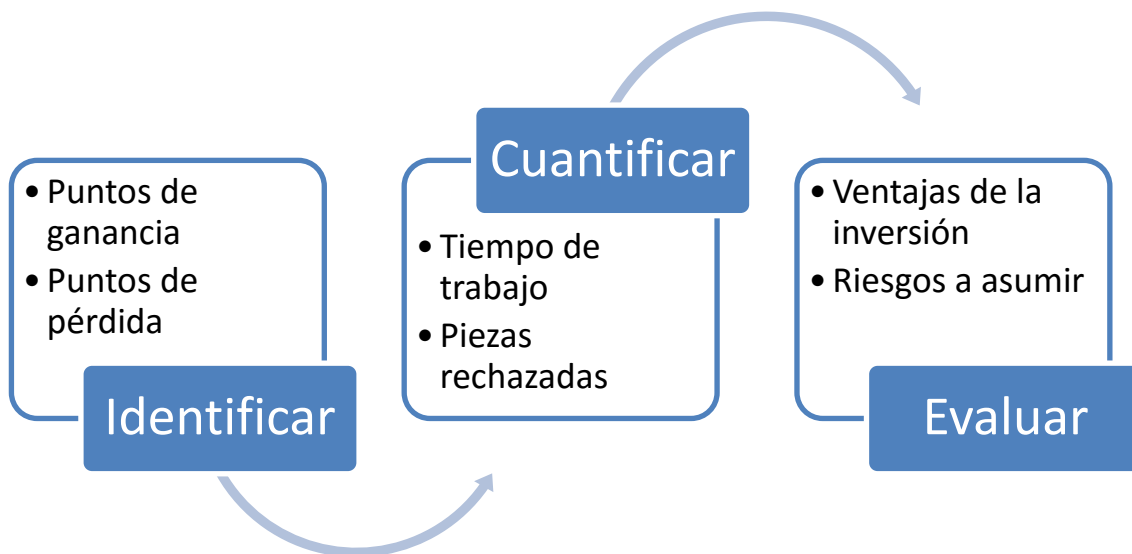


Se han expuesto en general dos soluciones para cada una de las tecnologías. Una primera opción más económica y conservadora que consiste en recorrer los equipos periódicamente realizando las pertinentes mediciones. Y la opción más innovadora que incluye la modernización de las instalaciones con la instalación de sensores individuales para realizar cada medición en tiempo real y comunicarla por red.

CAPÍTULO 9: GANANCIA ATRIBUIBLE A LA INSTALACIÓN



Para determinar la viabilidad lógica del proyecto de implantación se deben de realizar unos cálculos. En el ámbito industrial no tiene sentido realizar importantes inversiones sin estudiar previamente su rentabilidad esperable. Resulta imprescindible conocer los campos sobre los cuales la implementación va a tener efectos positivos. Una vez identificados dicho campos, cuantificar numéricamente la ganancia que producirá la inversión. Para cuantificar la ganancia numérica se debe seguir un criterio que no resulte demasiado arriesgado ni demasiado conservador. Se denomina retorno de una inversión a los beneficios que va a reportar frente a su no implementación.



En la fase de **identificación** de los puntos de ganancia de la implementación de un sistema de mantenimiento condicional se deben cuantificar tres aspectos principales: el tiempo operativo, reducción de defectos en piezas y la sincronización con el cliente. Para realizar la captación de datos de manera rudimentaria se requiere que una persona recorra la línea realizando mediciones de las pertinentes características, ya comentadas. Según las características que se hayan determinado relacionadas con el estado de deterioro de los elementos, esta ronda de adquisición de datos requerirá de cierta cantidad de tiempo. Otros factores como la localización de los instrumentos de medida, la accesibilidad de los puntos de lectura, la preparación previa a la medida (importante en el análisis vibratorio), la extensión de la línea de producción, el orden secuencial de los equipos recorridos en cada ruta o la periodicidad de los controles afectan al tiempo necesario para la toma de datos. Lo idóneo para medir el tiempo que se requiere para llevar a cabo las mediciones es cronometrar su realización por parte de la persona cualificada para ello. Se muestra un ejemplo de cálculo de ganancia económica por la automatización del sistema, en la que se han tomado datos arbitrarios en el aspecto del salario del personal. La revisión de los parámetros es la tarea que más tiempo conlleva y por ello supone el mayor coste económico de mano de obra.

Para esto, se trabaja con las dos tablas que se muestran a continuación. La primera contiene los datos a partir de los cuales se van a hallar los costes de personal: las rondas de control por semana, las semanas de trabajo anuales, la duración en minutos de cada jornada de trabajo (8x60min), las jornadas que realiza cada especialista a lo largo de un año y el coste que supone cada especialista un año en la empresa (este valor numérico no es únicamente el salario, se ha tomado una cantidad orientativa, no real). En la segunda tabla se van calculando progresivamente las celdas mediante factores de conversión extraídos de los datos de la primera tabla. De esta manera, se concluye para cada tipo de técnica el coste que le supone a la empresa que un especialista realice manualmente las rondas de control con la periodicidad definida. Se obtiene que el mayor gasto se tiene derivado del control de los parámetros máquina, ascendiendo casi hasta 60.000€. Los costes del análisis de vibraciones y temperatura son algo inferiores (10.000€).

| DATOS | |
|-----------------------------|-------------|
| Rondas de control/semana | 1 |
| Semanas/año | 48 |
| Minutos/jornada | 480 |
| Jornadas/(especialista·año) | 210 |
| Coste/(especialista·año) | 40,000.00 € |

| Análisis | Tiempo (min/ronda) | Tiempo (min/semana) | Tiempo (min/año) | Tiempo (jornada/año) | Personal (operario/año) | Precio (€/año) |
|-------------|--------------------|---------------------|------------------|----------------------|-------------------------|----------------|
| Temperatura | 527.80 | 527.80 | 25334.40 | 52.78 | 0.2513 | 10,053.33 € |
| Vibratorio | 499.60 | 499.60 | 23980.80 | 49.96 | 0.2379 | 9,516.19 € |
| Parámetros | | 3075.90 | 147643.20 | 307.59 | 1.4647 | 58,588.57 € |

Para cuantificar la reducción de piezas con defectos se debe atender al índice de no conformidad actual de la pieza. El índice de no conformidad es un parámetro de calidad de la producción que relaciona el número de piezas fabricadas rechazadas por defectos, frente al número de piezas fabricadas totales para un período de tiempo. La ganancia en este parámetro resulta una estimación muy aproximada e imprecisa, ya que se intentan predecir los efectos positivos que va a tener una tecnología de nueva implantación. Además, en grandes industrias con valores muy bajos de piezas rechazadas y multitud de factores influyendo en este parámetro se hace complicado cuantificar numéricamente esta ganancia antes de la instalación de los equipos. No obstante, es un indicador que debe descender tras la implementación de las tecnologías. Todo dependerá del mantenimiento sistemático que se realice, si las máquinas se conservan en buen estado, el mantenimiento condicional tiene una ganancia menos notoria ya que la cantidad de fallos que se producen es mínima de por sí.

Por otra parte, la sincronización con el cliente es un concepto de la producción “Just In Time (JIT)” que alude a la minimización de trabajos en curso y stocks de productos terminados gracias a la fabricación bajo demanda. Se busca producir las piezas justas y concretas que el cliente va a requerir inmediatamente. El ideal es que la culata que se va a montar en el motor, acaba de ser fabricada y entregada. Este nivel de sincronización es un ideal teórico que se busca alcanzar en las industrias para



poder reducir los grandes costes que implican los espacios para stock de piezas, el deterioro de los productos acabados ligado a su almacenaje o el sobredimensionamiento de las líneas para abastecer los stocks de seguridad. Para conseguir que las piezas se fabriquen “justo a tiempo” se deben eliminar los sucesos aleatorios que traban el flujo de trabajo en las líneas. Entre estos sucesos, destacan las paradas inesperadas de las máquinas por problemas eléctricos o mecánicos de sus elementos. El mantenimiento condicional tiene la finalidad principal de predecir y evitar estas mencionadas paradas no programadas en las máquinas críticas del proceso. Por lo tanto, el nivel de sincronización se puede aumentar sustancialmente cuando el mantenimiento condicional se implementa y domina. En este trabajo se describe la fase de implementación, debido a que el dominio de las técnicas requiere una evolución temporal prolongada del sistema y coordinación por parte de los expertos de mantenimiento.

Además, se debe valorar el coste de reparación de una avería imprevista sobre el elemento frente al coste de una avería detectada con anticipación. La mayoría de las averías se agravan por no detectarse a tiempo. Y en muchos de los casos, una avería sin mucho coste de reparación, se propaga afectando a elementos de la máquina cuya reparación resulta bastante más costosa. En el caso concreto de los electrohusillos, las averías de mayor importancia se reparan externamente con un coste aproximado de 14.000€ por unidad. En cambio, un defecto detectado a tiempo puede ser internamente reparado por 1.000€. La ganancia resulta muy destacable en este caso.

Otro parámetro sobre el que la instauración del mantenimiento condicional tiene gran influencia es el rendimiento operacional de las máquinas. Este indicador hace referencia a la relación entre el tiempo que las máquinas están en funcionamiento frente al tiempo total de producción. Las averías imprevistas de larga duración repercuten gravemente sobre este ratio, por ello su aumento con las nuevas técnicas se prevé notable.

Por último, el coste asociado al sobreconsumo de recambios que se produce con el mantenimiento sistemático. Los períodos de sustitución de elementos provocan que se cambien cuando su ciclo de vida se estima próximo a su fin. Pero esta estimación no se hace en base al estado real de deterioro, por ello, se realizan recambios con mayor frecuencia que la necesaria. La reducción en el coste de materiales es una consecuencia de la monitorización de condiciones de degradación.

PARTE III: ANÁLISIS DE RESULTADOS



En la última parte de este trabajo se va a enfocar el estudio teórico anteriormente expuesto desde el punto de vista de la implantación real en la industria. De esta manera se pretende ilustrar y demostrar el valor que suponen este conjunto de técnicas en las plantas de producción. Ya se relató en la primera parte el campo de aplicación concreto de estas técnicas, la fabricación por mecanizado de piezas de motores de automóviles.

Para la implantación de las técnicas es necesario el estudio previo realizado, justificando así la inversión en sensores y equipos de medición. Resulta indispensable probar la fiabilidad de las técnicas en algún equipo piloto antes de su instalación en todo el perímetro de la factoría.

Se va a exponer la implementación óptima desde el punto de vista tecnológico en el primer capítulo y luego se expondrá la solución escogida por la empresa para su línea de producción de culatas. Se finalizará el trabajo con detalles adicionales acerca de las ventajas de este sistema de mantenimiento y su integración en el plan de mantenimiento preventivo ya vigente.

CAPÍTULO 10: SITUACIÓN FINAL PREVISTA



La solución que se propone para conseguir la monitorización de las condiciones de funcionamiento de los equipos es un plan de implantación versátil que se adapta a las necesidades de la línea, y que contempla la futura implantación en el resto de líneas de producción de la factoría.

Existen dos modos de control de parámetros básicamente según el impacto que tiene el fallo del elemento controlado: alto o bajo.

En elementos cuyo **impacto** es **alto**, se requiere un seguimiento online, automático, en tiempo real y en continuo. Esto comprende la instalación de sensores fijos para realizar las mediciones; todos ellos conectados a una red de datos que los envía al monitor de control de la línea. De esta manera se tiene información en tiempo real del estado de degradación de los equipos. Esto proporciona gran control y seguridad ante el fallo de algún elemento. Con unos niveles de alarma y avería definidos con precisión se conseguirá eliminar las paradas no programadas. En otro tipo de industrias con menos cantidad de elementos a controlar, con maquinaria única de gran envergadura y con fabricación de un solo producto; esta implantación online es la opción más acertada. Por ejemplo, plantas de tratamiento químico con grupos de bombeo de gran tamaño, o cementeras. En el proceso descrito, serían elementos con impacto alto los parámetros máquina y los electrohusillos de los centros de mecanizado. Los parámetros máquina por su importancia en el proceso, y por la elevada frecuencia con la que se requiere su control. Por otra parte, el control de los electrohusillos viene motivado por el coste del mantenimiento de sus graves averías y la especial importancia que tienen sobre la producción en líneas que no cuentan con su maquinaria duplicada. La propuesta abarca la instalación de todos los sensores que miden los parámetros máquina de la línea, ya sean medidores de presión, caudal, temperatura... Además de la monitorización con acelerómetros fijos de las vibraciones de los electrohusillos de todos los centros de mecanizado. Esta implementación debe eliminar la rutina tediosa de supervisar cada turno los parámetros de operación de las máquinas. Además de añadir una vigilancia completa sobre el estado de los electrohusillos.

En otro grupo se encuentran los elementos de **impacto bajo**. En el control de los mismos se propone un sistema offline, manual, con mediciones periódicas. Para ello se debe contar con unos equipos de medición lo más versátiles posible, para que el especialista se desplace cómodamente por las instalaciones realizando las pertinentes tomas de datos. En el proceso descrito quedarían como únicos elementos con impacto bajo los cuadros eléctricos de las máquinas. Se ha determinado esto en base a la poca reducción en el coste de mantenimiento que conlleva la detección temprana de un defecto, los elementos eléctricos tienen un coste relativamente bajo. Aunque, sobre todo el coste que conllevaría la instalación de sensores de temperatura en todos ellos no se rentabilizaría en muchos años. La solución propuesta es la realización de rondas de control con una cámara de infrarrojos para controlar todos estos elementos. No obstante, siempre se podría decidir controlar la temperatura de algún otro elemento con mayor impacto de manera continua. De

hecho, esto se hace en procesos en los cuales la transferencia de calor juega un papel principal.

En definitiva, podría parecer que la implantación de un sistema de mantenimiento predictivo debe ser uniforme en todas las instalaciones. Sin embargo, hay que estudiar cada tipo de elemento en profundidad. De lo contrario, la instalación de todo el entramado de sensores no resultará una inversión rentable para la empresa. Toda la instalación debe trabajar de manera conjunta para proveer al personal de mantenimiento de información acerca del estado de degradación. El conjunto de datos debe constituir una herramienta eficaz de información en base a la cual llevar a cabo actuaciones.

El robusto sistema de mantenimiento diseñado tiene como finalidad asegurar la eliminación total de los defectos imprevistos sobre los elementos controlados. La monitorización por sí sola no evita que los elementos fallen. Sino que es un fiel medio de información acerca del estado de los mismos, en base al cual se pueden predecir los fallos eventuales.

La previsión es que no se vuelvan a producir paradas no programadas debidas a los dispositivos estudiados en este trabajo. Se espera que se predigan fallos y se programen intervenciones. Evitando las intervenciones urgentes en reacción a fallos ya producidos. Esto permitirá reducir aún más el stock de seguridad de la línea debido al aumento en la fiabilidad de la misma. La seguridad sobre la tasa de fabricación horaria, permitirá minimizar el espacio de almacenamiento y la cantidad de producto acabado. La sincronización con el cliente de culatas mecanizadas se ajustará más a la situación ideal (la culata se fabrica justo antes de que se requiera para su montaje sobre el bloque motor). El activo inmovilizado de las líneas se podrá reducir. Los costes de mantenimiento descenderán, las reparaciones serán más sencillas y el personal desarrollará otras capacidades. El rendimiento operacional (aprovechamiento del tiempo para la producción de piezas buenas) aumentará, debido al mayor tiempo de disponibilidad de las máquinas. Los trabajadores sentirán que su trabajo tiene mejores resultados y que se llevan a cabo menos acciones urgentes, elevando la moral de la plantilla. En definitiva, todas estas consecuencias reducirán el “no valor añadido” ligado a la fabricación de culatas, revirtiendo estos factores en la competitividad y el prestigio internacional de la planta.



CAPÍTULO 11: SITUACIÓN FINAL ALCANZADA



Para la implantación in situ del plan estudiado se han seguido rigurosamente los pasos del ciclo de Deming para lograr una mejora progresiva en el proceso de iniciación de la planta al mantenimiento condicional. Este ciclo establece las etapas básicas a llevar a cabo para obtener el resultado esperado en la implementación de un sistema de mejora. La característica más importante del sistema es que carece de fin, siempre las fases se van repitiendo, asegurando la mejora continua de los sistemas. Los resultados de la implementación de este ciclo de gestión de sistemas son la mejora en la competitividad, calidad y producción; por lo que su aplicabilidad abarca un perímetro muy amplio.



La planificación del despliegue abarca la etapa PLAN; en este caso, esta primera fase resulta la más extensa; debido a que se trata de implantar un proyecto novedoso sin referentes en la planta. La fase de concepción abarca desde los ensayos iniciales hasta el arranque de las mediciones. Primeramente, se realizan múltiples ensayos especialmente en el campo del análisis vibratorio sobre componentes similares a los existentes en la línea de fabricación. Tras determinar el modo de funcionamiento a poner en marcha, formar al personal e instalar los sensores requeridos se comienza con la realización de las tomas de datos.

La fase DO engloba el proceso de captación de datos desde los distintos elementos. En el caso de las mediciones online, esta fase es automática y continua. Sin embargo, en las medidas offline, se tiene un proceso discreto, manual.

Una vez que se cuenta con los datos se realiza el estudio y seguimiento de los mismos en lo que sería el estadio CHECK. Las mediciones se analizan a fin de detectar posibles fallos futuros en los medios.

Por último, la programación y la realización de las acciones pertinentes constituyen la fase ACT. Las acciones a tomar pueden alcanzar únicamente al recambio o

reparación de un componente, pero se insiste en que la fuente real de ganancia es la erradicación de las causas raíz. Resulta indispensable para la mejora continua del sistema de mantenimiento, la reflexión sobre los defectos más repetidos con la finalidad de encontrar sus causantes y minimizarlos o eliminarlos, en el mejor de los casos.

Tras el estudio realizado, se deciden implantar rutas de **control de temperatura** en los cuadros eléctricos de la línea descrita. El recorrido de estas rutas consiste en la medición con cámara de infrarrojos de las temperaturas de los elementos de los cuadros eléctricos y su anotación sobre una plantilla impresa. En un segundo paso, se introducen estos datos en las hojas de cálculo obteniéndose un plano sinóptico descriptivo del estado de la línea y un registro de alarmas y averías. Además, el perímetro no se limitó a esta línea, sino que se amplió abarcando todas las demás líneas de producción de piezas prismáticas. Ascendiendo a un total de 8 líneas revisadas con una periodicidad bimensual o trimensual en algún caso, dependiendo de la máquina en cuestión y la frecuencia de sus averías. La recogida de estos datos se mantuvo manual aunque la previsión del empleo de tabletas electrónicas por parte del personal de mantenimiento se espera que reduzca el tiempo de captación de datos e introducción de datos. En los meses siguientes a la implementación se detectaron algunos excesos de temperatura que fueron corregidos con intervenciones programadas en las que substituyó el elemento en cuestión por un recambio nuevo. Estas acciones fueron reflejadas en el sinóptico, los elementos que se encontraban averiados en el momento de la medición volvieron a su estado OK en la siguiente medición (tras la intervención). Además, en los meses de verano se identificaron armarios cuya refrigeración resultaba insuficiente gracias a mediciones con la cámara termográfica. Como acción, se instalaron climatizadores temporales para la estación de verano, consiguiéndose así que la temperatura de operación se mantuviese en el intervalo admisible. Nótese que en los meses de verano la temperatura de la factoría aumenta notablemente; por esto, la capacidad de disipación de calor por parte de los elementos eléctricos se ve reducida. Las termografías permiten identificar aquellos armarios que requieren de una climatización especial durante esta época.

En el ámbito del **análisis vibratorio**, se realizaron experimentos durante varias semanas en diversos centros de mecanizado de las líneas. Experimentos discretos, que consistieron en imantar el acelerómetro en el punto de medición concreto del electrohusillo, configurar el software IFM Octavis VES004 (suministrado por el fabricante), ajustando la velocidad del giro del eje y la geometría de los rodamientos y almacenar la medición de un breve lapso de tiempo para su posterior estudio.



Caso 1

Un ejemplo de esta metodología, es el estudio realizado sobre un electrohusillo girando a la velocidad de consigna 10.000rpm, con unos rodamientos de bolas cerámicas de alta precisión (delantero y trasero) de SKF modelo 7013ACE/HCP 4A H1DT.

El acelerómetro se imantó sobre la superficie metálica en el intervalo de medición (ilustración 44).

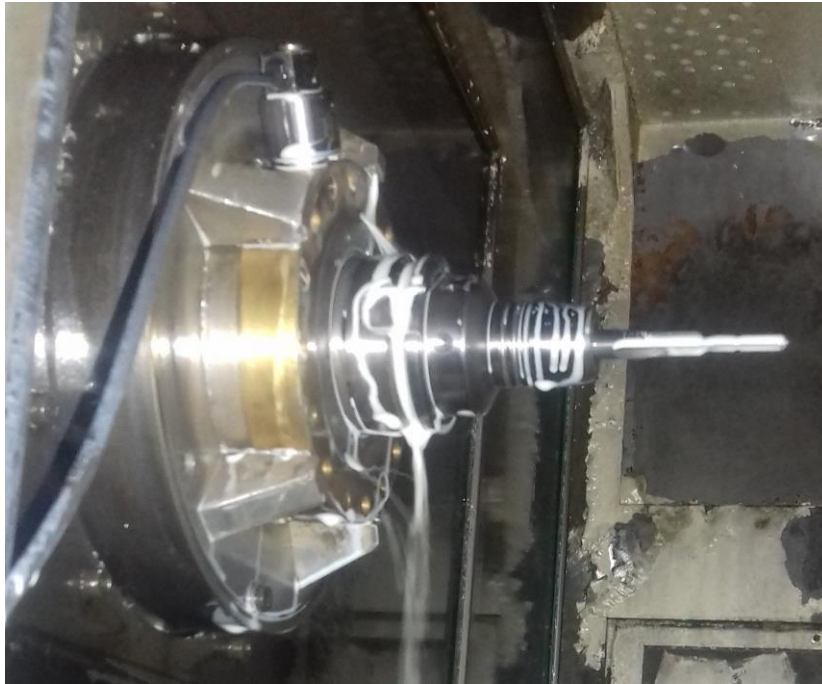


Ilustración 44 Posicionamiento del acelerómetro sobre electrohusillo

El fabricante proporciona en su web un cálculo de las frecuencias de los modos de fallos de los distintos elementos que conforman el rodamiento (ilustración 45). Este punto es muy importante porque el empleo de las fórmulas descritas en el capítulo 6, resulta tedioso y su precisión es menor. La identificación de las frecuencias naturales de los distintos elementos es la clave para la detección de vibraciones sobre rodamientos o cualquier dispositivo mecánico.

| | |
|--|-----------|
| f_i Rotational frequency of the inner ring | 166.7 Hz |
| f_e Rotational frequency of the outer ring | 0 Hz |
| f_c Rotational frequency of the rolling element and cage assembly | 75.4 Hz |
| f_r Rotational frequency of a rolling element about its own axis | 781.1 Hz |
| f_{ip} Over-rolling frequency of one point on the inner ring | 2282.9 Hz |
| f_{ep} Over-rolling frequency of one point on the outer ring | 1883.8 Hz |
| f_{rp} Over-rolling frequency of one point on a rolling element | 1562.3 Hz |

Ilustración 45 Rodamiento SKF 7013ACE/HCP 4A H1DT, frecuencias naturales

Se visualiza el espectro de la vibración, observando los picos correspondientes con las frecuencias de defecto que se desean detectar (ilustraciones 46 y 47).

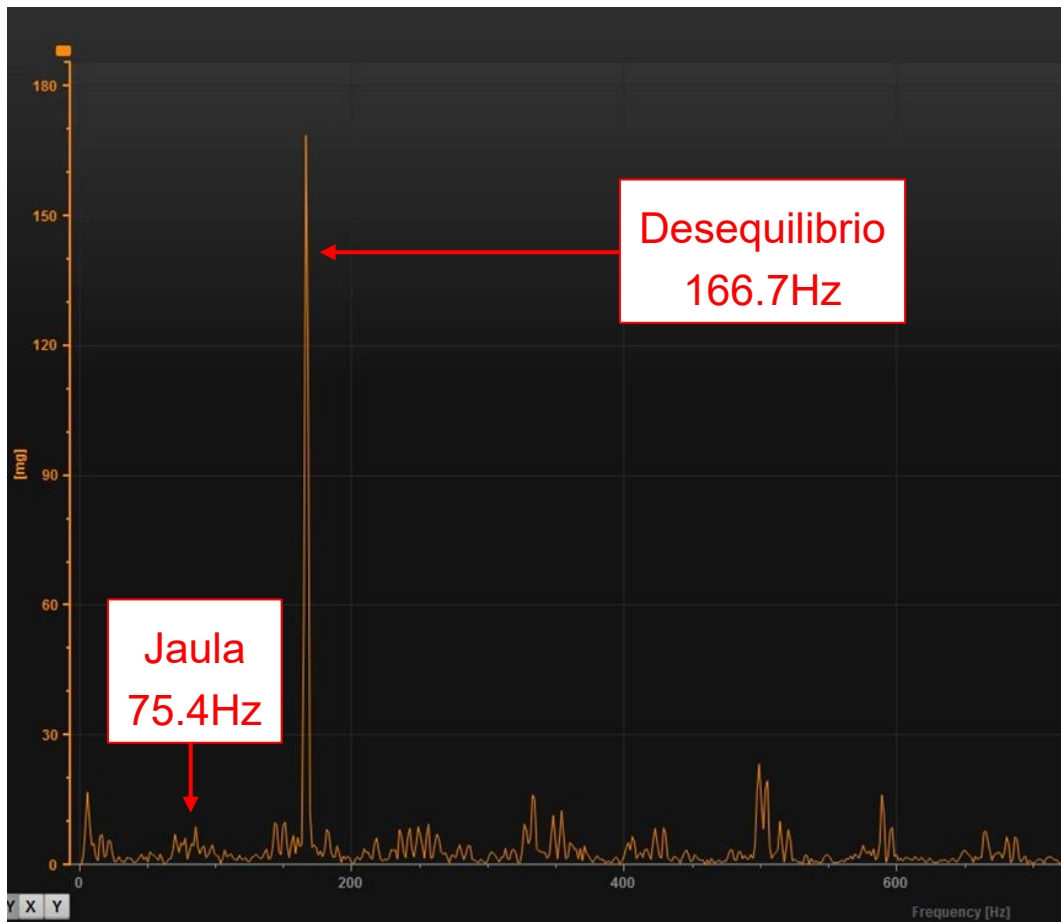


Ilustración 46 Espectro de aceleración (mg-Hz) entre 0Hz y 700Hz

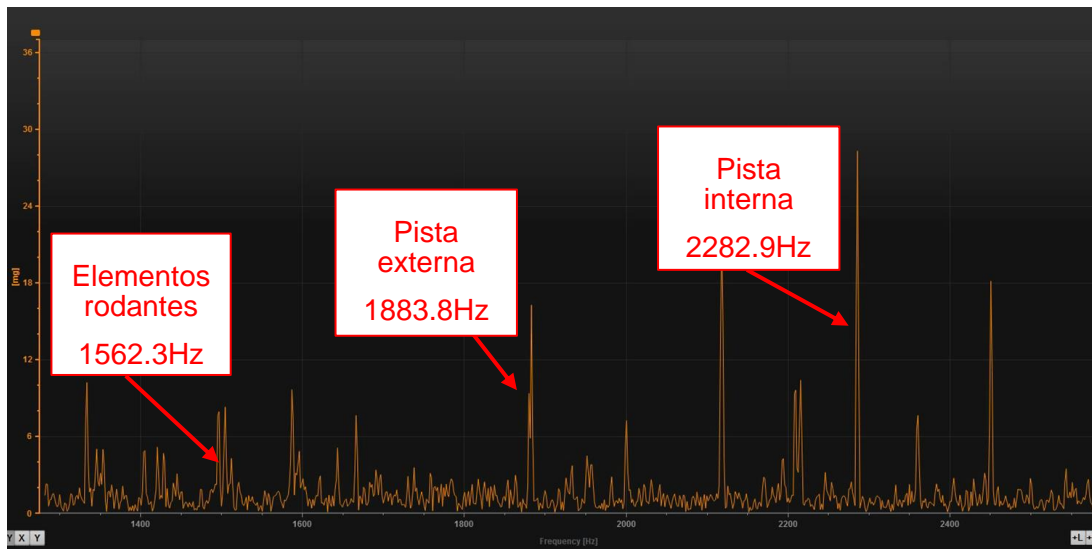


Ilustración 47 Espectro de aceleración (mg-Hz) entre 1300Hz y 2600Hz

Se concluye que la observación resulta un éxito, puesto que se han identificado con claridad las frecuencias de defecto teóricas en el espectro de vibración real. Nótese que la observación del espectro se realiza en dominios relativamente pequeños, esto permite reducir la resolución de la gráfica. La resolución de la gráfica es el tamaño más pequeño del intervalo representado, cuanto menos resolución, mayor calidad. Si se trabaja con un dominio del espectro de la frecuencia demasiado grande, la resolución (espaciado entre medidas) deberá ser mayor, perdiéndose calidad en la representación y llegando a ocultarse los picos de defectos.

Esta primera prueba, se realizó sobre una máquina piloto sin mecanizar ninguna pieza en su interior girando a una velocidad de consigna constante de 10000rpm. Esta situación es el caso más favorable, puesto que se tienen muy pocos ruidos que distorsionen la medición.

Caso 2

Se procede en este segundo caso de estudio de una manera diferente sobre otro electrohusillo de otro equipo. En este caso se deseaba probar la utilidad de las mediciones de vibraciones online de forma continuada. Para ello se instaló un acelerómetro fijo durante la parada programada de la línea, para no interrumpir la producción. La intervención llevó en torno a dos horas. Se consiguió atornillar el acelerómetro con uso adicional de adhesivo, al electrohusillo, asegurando de esta forma la fijación perfecta sobre la superficie (ilustración 48). El uso de acelerómetros imantados produce la pérdida de información sobre las vibraciones de muy alta frecuencia (5kHz) por defectos en la fijación. En esta aplicación no va a influir la pérdida de precisión debida a la imantación, ya que los defectos a detectar se encuentran a frecuencias inferiores en todos los casos (máx. 3kHz). No obstante, este detalle se debe tener en cuenta en otro tipo de aplicaciones con mayor velocidad de rotación del eje o mayores factores de ampliación.



Ilustración 48 Acelerómetro atornillado sobre electrohusillo.

Este elemento cuenta con varios rodamientos de bolas modelo: SKF 71920-ACDGB/P4A y un rodamiento de rodillos modelo: SFK NN3018K/W33SP. Las frecuencias características de los modos de fallo de dichos rodamiento resultan similares (ilustración 49). En su ciclo de trabajo, el electrohusillo gira a 2520rpm, obteniéndose las siguientes frecuencias.

| | |
|--|----------|
| f_i Rotational frequency of the inner ring | 42 Hz |
| f_e Rotational frequency of the outer ring | 0 Hz |
| f_c Rotational frequency of the rolling element and cage assembly | 19 Hz |
| f_r Rotational frequency of a rolling element about its own axis | 196.6 Hz |
| f_{ip} Over-rolling frequency of one point on the inner ring | 598.4 Hz |
| f_{ep} Over-rolling frequency of one point on the outer ring | 493.6 Hz |
| f_{rp} Over-rolling frequency of one point on a rolling element | 393.3 Hz |

Ilustración 49 Rodamiento SKF 71920-ACDGB/P4A, frecuencias naturales

La visualización de los espectros resulta exitosa, al comprobarse el cumplimiento de las frecuencias características calculadas (ilustraciones 50 y 51).



Ilustración 50 Espectro de velocidad (mm/s-Hz) entre 0Hz y 60Hz



Ilustración 51 Espectro de velocidad (mm/s-Hz) entre 300Hz y 650Hz

En este segundo estudio se observa un mayor nivel de ruido, atribuible al mecanizado de la pieza. Este electrohusillo trabajaba durante el mecanizado de piezas, por lo tanto, el ruido en la medida es normal. No obstante, se consiguen distinguir con suficiente certeza las vibraciones de cada posible defecto.

Caso 3

En este último experimento se extraen los datos de medición de vibraciones de una máquina piloto que contaba ya con la instalación de acelerómetros de fábrica desde hace dos años. Por lo tanto el período de medición es mucho más extenso que en el caso 2 y se puede observar una evolución mayor en la degradación del elemento. Además se trata de un centro de mecanizado con dos electrohusillos que tienen la misma carga de trabajo, lo cual permite comparar las magnitudes medidas en ambos.

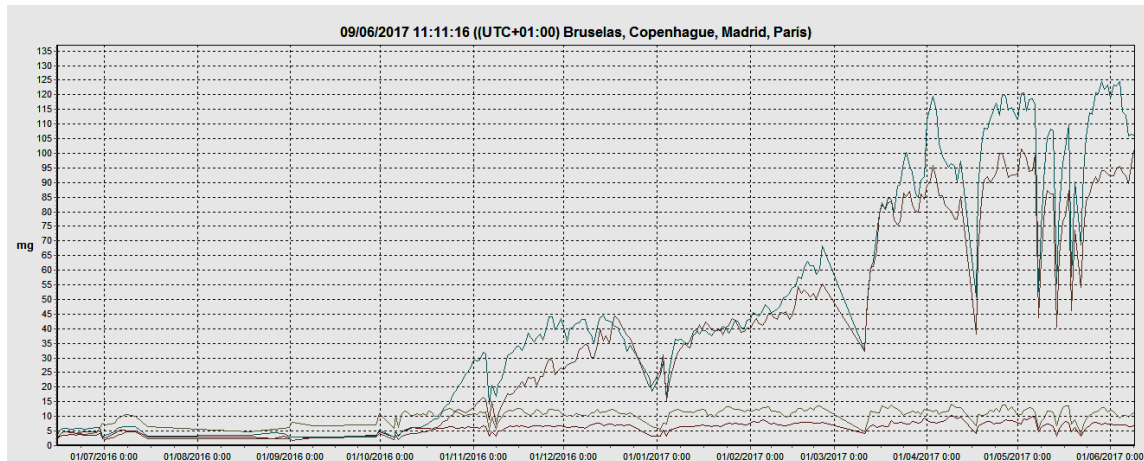


Ilustración 52 Evolución de degradación en rodamientos de husillo 1 y 2.

En la gráfica de la ilustración 52 se representan los rodamientos delanteros y traseros de dos brochas, por esto se distinguen cuatro representaciones. Se distingue claramente que la degradación de los rodamientos del electrohusillo 2 es anormalmente superior que la de sus homólogos del electrohusillo 1. Adicionalmente, cabe destacar que la degradación avanza a gran velocidad. Sería esperable que este electrohusillo comenzase a dar problemas próximamente.

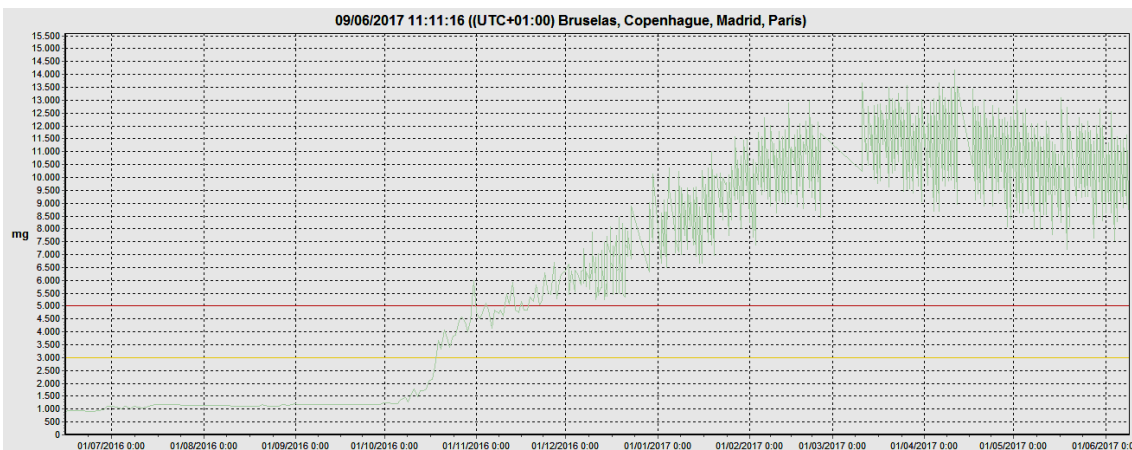
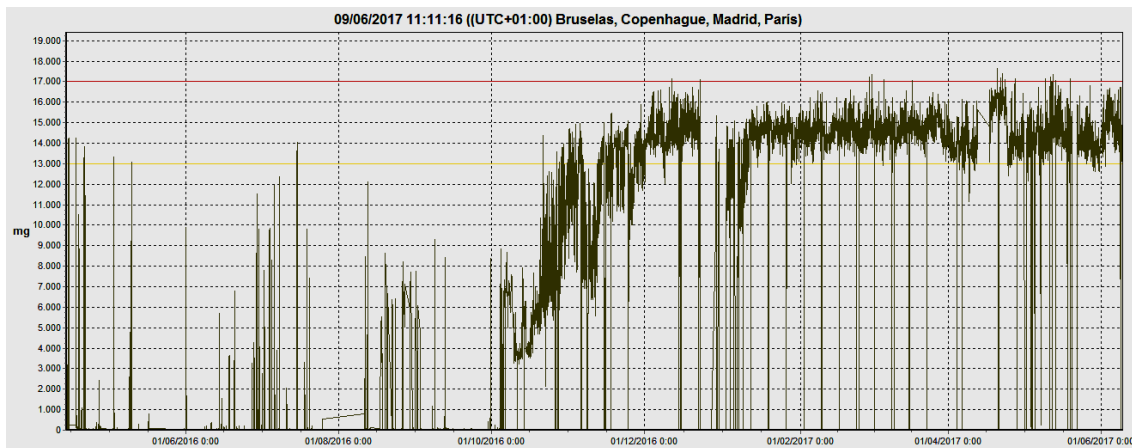


Ilustración 53 Aceleraciones de pico en electrohusillo 2.

En las dos gráficas de la ilustración 53 se identifican los picos de aceleración (mg) frente al tiempo del electrohusillo presumiblemente degradado. Esta magnitud representa los impactos que se registran sobre el elemento, es un parámetro característico del desgaste de los rodamientos. Nótese que se han superado los límites de alarma (recta amarilla), e incluso los límites fijados de avería (recta roja).

Ante tales resultados, sería esperable que las piezas mecanizadas en el electrohusillo 2 de este centro de mecanizado tuvieran falta de calidad. Ya que se ha detectado que la vibración de sus rodamientos ha alcanzado valores preocupantes. Para comprobar esta teoría, se revisan los datos históricos de la calidad de las piezas. Se comparan las mediciones de una cota diametral en ambos electrohusillos.



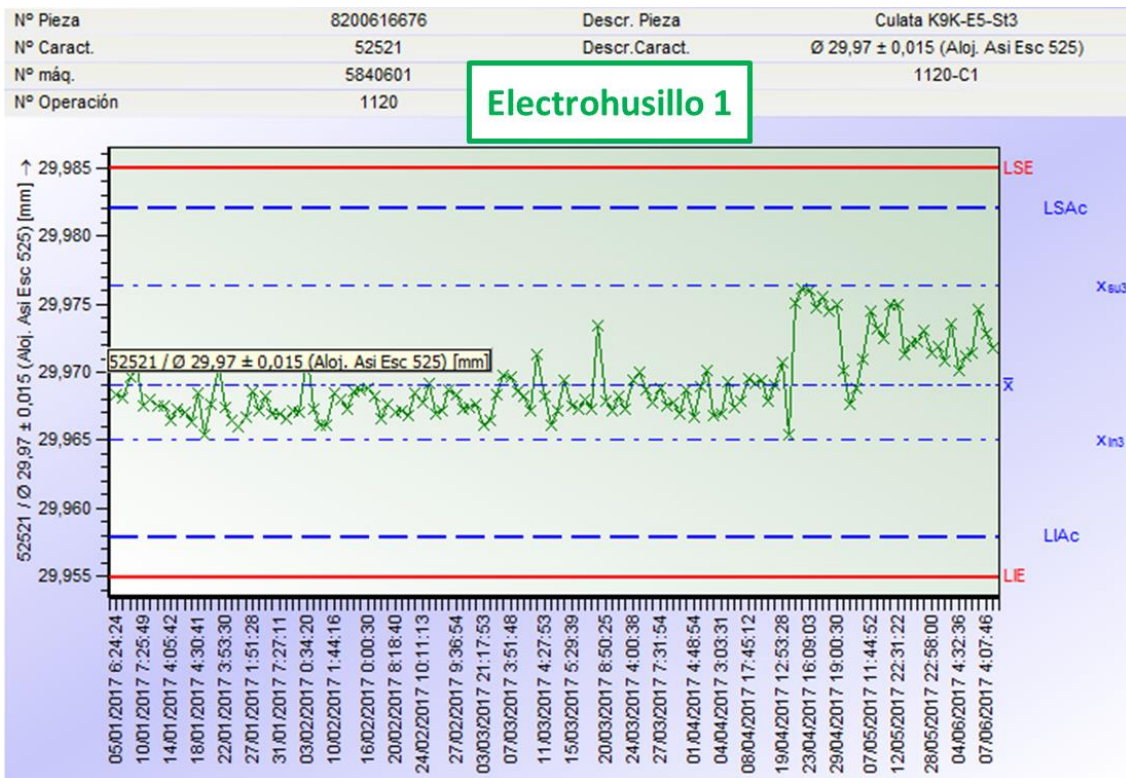


Ilustración 54 Diámetro de alojamiento de asiento de escape

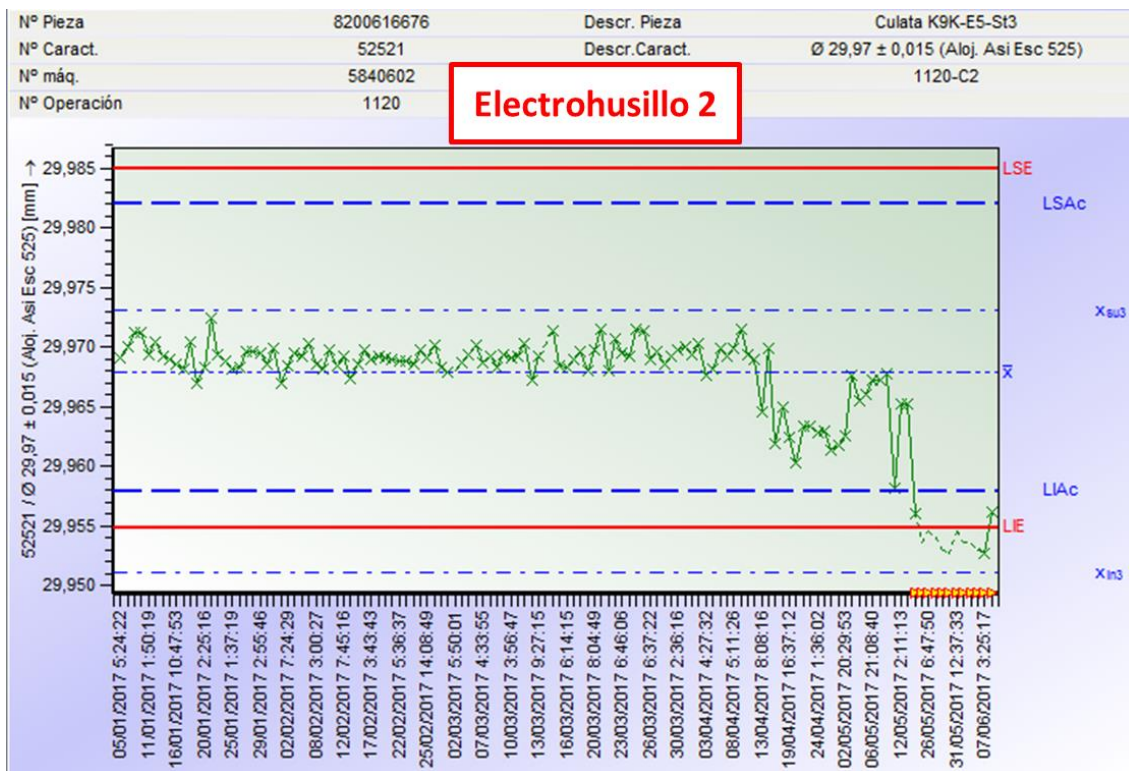


Ilustración 55 Diámetro de alojamiento de asiento de escape

Las presunciones se confirman tras la visualización de las gráficas de la evolución del diámetro del alojamiento de asiento de escape (ilustración 55). Esta característica cuenta con una tolerancia de $\pm 0.015\text{mm}$. Se observa que las últimas

piezas mecanizadas por el presunto electrohusillo degradado, están resultando no conformes, por alcanzar un valor menor al límite inferior.

Tras las pruebas expuestas acerca el control de vibraciones se decidió desplegar una primera aproximación al mantenimiento condicional vibratorio, descrita en detalle en el capítulo 13.

En cuanto a los **parámetros máquina** se decidió no invertir sobre ellos, ya que su dispersión por la línea resultaba muy extensa, manteniendo el rudimentario método de ronda de control visual a cargo de especialista. El principal motivo para tomar esta decisión fue la existencia de muchos parámetros diferentes, distribuidos por las máquinas de las líneas. Esto supone un coste que se decide no asumir. Recuérdese que los costes atribuidos a la revisión de estos parámetros superaban con creces el valor de las revisiones térmicas y vibratorias (capítulo 9).



CAPÍTULO 12: MEJORA EN EL PLAN DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO



El plan de mantenimiento preventivo de la empresa cuenta con unos indicadores porcentuales del tipo de mantenimiento llevado a cabo. Esto permite discernir entre el mantenimiento correctivo, preventivo y predictivo realizado. El porcentaje de mantenimiento predictivo realizado frente a mantenimiento total se vio incrementado sustancialmente tras las nuevas tecnologías implantadas, mostrándose así el avance en el nivel de mantenimiento de la empresa gracias a la implementación del plan expuesto.

En el aspecto del **control de temperatura de elementos eléctricos** ya se venía controlando algún equipo. Sin embargo, el aumento del número de equipos sometidos a termografías periódicas fue enorme. Incluyéndose casi el 100% de los equipos de todas las líneas. Esto permitió contar con una mayor base de datos, sirviendo de vital ayuda para evitar paradas de máquina debidas a fallos eléctricos. La principal ventaja del mantenimiento condicional termográfico es que no requiere detener la máquina para realizar la medición. Este detalle es muy significativo a la hora de planificar las mediciones, ya que permite realizarlas fuera del horario de parada programada. El especialista recibe el trabajo que debe realizar durante la semana y aprovecha los días en los que su carga de trabajo es menor para realizar la ronda de termografías. Se detectan fundamentalmente tres problemas gracias al control termográfico sobre las líneas de mecanizado: conexiones deficientes, elementos próximos a fin de vida o problemas de climatización. El principal beneficio económico se obtiene cuando la intervención supone un simple conexionado adecuado de algún cableado. Esto es debido a que el problema potencial que se detecta tiene una solución de coste cero, consistente en conectar el elemento adecuadamente. Y que de esta manera se evita el recambio del elemento, ahorrando el consecuente coste y el tiempo de parada asociado a su cambio urgente por avería imprevista.

En el **control de las vibraciones** se partía de cero, se asentaron satisfactoriamente las bases para una implantación capaz de abarcar todos los centros de mecanizado que se deseasen. Sin embargo, en el período de redacción de este proyecto solo se alcanzó el diseño de un sistema de mediciones periódicas offline en cuatro centros de mecanizado y un control online en un centro de mecanizado de cuatro electrohusillos. Se diseñó una ficha de operación (ilustración 56) indispensable para la formación de los especialistas en este análisis. Ideándose un procedimiento robusto, rápido, sencillo y eficaz para la medida de vibraciones en una ronda de control, gracias al empleo de una maleta con indicaciones lumínicas (ilustraciones 57 y 58). El procedimiento comienza por la colocación del especialista de una máscara cilíndrica, hecha a medida, sobre el electrohusillo en cuestión. Dicha máscara cuenta con una cavidad especialmente concebida para ubicar el acelerómetro en la posición justa de medida, evitando posicionamientos equívocos. Tras la puesta en marcha del electrohusillo en vacío, montado con una herramienta equilibrada específicamente para el análisis de vibraciones, se escoge el parámetro a medir (desequilibrio, rodamientos) con la llave y se visualizan las señales lumínicas activas en cada caso. En el interior de la maleta se cuenta con un procesador previamente programado

para la medida de estas características; con salidas hacia las luces de tal manera que se corresponda su encendido con el estado de degradación de elemento. La concepción de este procedimiento ha tratado de garantizar una medida eficaz de las vibraciones, pero con un método simple y rápido. El principal inconveniente que se plantea es la necesidad de detener el flujo de producción por el centro de mecanizado en cuestión.

| | | |
|----|--|--------------------------------------|
| 1 | Realizar intervención en máquina parando a fin de ciclo. | 1. Preparación para la intervención. |
| 2 | Desplazar electrobrocha con movimientos JOG para ubicarlo en la posición: X = xxx mm, Y = yyy mm, Z = zzz mm. | |
| 3 | Abrir puerta de zona de cambio de herramienta lado Q1, consignar puerta y retirar protecciones para acceder a la electrobrocha. | 2. Instalación de captador de datos. |
| 4 | Bridar sobre la electrobrocha la herramienta equilibrada (foto 1) específica para la medición en el centro de mecanizado. | |
| 5 | Colocar máscara de electrobrocha (foto 2) con hueco para posicionamiento de acelerómetro sobre la misma. | |
| 6 | Extraer el acelerómetro de la maleta. | |
| 7 | Desproteger la cara imantada del acelerómetro retirando la chapa metálica que la recubre. | |
| 8 | Depositar paulatinamente el acelerómetro imantado sobre la superficie de la electrobrocha en el hueco que la máscara deja libre (foto 3), evitando que se golpee. | |
| 9 | Retirar máscara de la electrobrocha. | |
| 10 | Proteger el tramo del cable del acelerómetro que queda en el interior de la máquina con su recubrimiento plástico. | |
| 11 | Cerrar puerta haciendo pasar el cable del acelerómetro por los espacios libres . | |
| 12 | Ejecutar en MDA el programa "VIBRACION" para hacer girar a la electrobrocha a la velocidad de consigna. | 3. Arrancar electrobrocha. |
| 13 | Conectar la alimentación de la maleta a una toma de 220V. | 4. Realizar medición, completar OT |
| 14 | Poner llave en maleta de análisis de vibraciones (foto 4) en la posición 1 y esperar 10 segundos. | |
| 15 | Observar indicaciones luminosas (foto 4) situadas en la tapa de la maleta (verde=OK, naranja=ALERTA o rojo=AVERIA). | |
| 16 | Anotar en OT el estado de degradación de la electrobrocha observado en parámetro medido. | |
| 17 | Poner llave en maleta de análisis de vibraciones en la posición 2 y esperar 10 segundos. | |
| 18 | Observar indicaciones luminosas situadas en la tapa de la maleta (verde=OK, naranja=ALERTA o rojo=AVERIA). | |
| 19 | Anotar en OT el estado de degradación de la electrobrocha observado en cada parámetro medido. | |
| 20 | Retirar la herramienta equilibrada de la electrobrocha. | |
| 21 | Detener la ejecución del programa "VIBRACIÓN". | 5. Finalizar intervención. |
| 22 | Abrir puerta y consignar la misma para acceder al punto de medida. | |
| 23 | Retirar de la electrobrocha la herramienta equilibrada específica para la medición en el centro de mecanizado. | |
| 24 | Separar paulatinamente el acelerómetro imantado, evitando que se golpee. | |
| 25 | Limpiar con un trapo el cableado y el acelerómetro, eliminando los posibles restos de taladrina. | |
| 26 | Guardar el dispositivo en la maleta, protegiendo la cara imantada con la chapa metálica. | |
| 27 | Desconectar equipo de medición de la toma eléctrica. | |
| 28 | Colocar protecciones y cerrar puerta. | |
| 29 | Llevar máquina a origen y arrancar ciclo automático. | |

Ilustración 56 Ficha de formación de especialistas.



Ilustración 57 Detalle exterior de maleta para análisis de vibraciones



Ilustración 58 Detalle interior de maleta para el análisis de vibraciones

En esta primera fase de la implantación de las tecnologías de análisis vibratorio en la planta se escogieron 5 máquinas únicas, cuyo fallo detiene la producción. Para la integración del análisis vibratorio en el plan de mantenimiento preventivo se define una periodicidad trimensual en las mediciones. Lo recomendable resultaría revisar semestralmente los equipos, pero en el arranque se decidió aumentar dicha frecuencia. El punto clave de la aplicación de la teoría de vibraciones a los elementos en cuestión es la identificación de los modos de frecuencia de cada uno de ellos. El modo de frecuencia del desequilibrado es muy simple, pues se corresponde con la frecuencia de rotación del eje. Sin embargo, la identificación de los modos de frecuencia de cada componente de los rodamientos (jaula, pista externa, pista interna, bolas o rodillos) requiere del conocimiento de ciertos factores. Estos factores multiplicados por la frecuencia de rotación del eje permiten identificar la vibración de cada elemento del rodamiento, revelando así su desgaste. Para la obtención de estos factores ya se comentó en el capítulo 6 que resulta indispensable conocer las características geométricas del rodamiento. Este paso se ha llevado a cabo en todas las máquinas a controlar para la configuración del software de captación. A la hora de ampliar el perímetro de control en el futuro se deberá consultar la información técnica para conocer las características del rodamiento a estudiar y su denominación

DIN. Introduciendo la denominación DIN en los calculadores de frecuencias de los principales proveedores, se obtienen con precisión los factores de amplificación para cada modo de fallo.

Tras la inserción de todas las nuevas actividades periódicas en el plan de gestión del mantenimiento industrial híbrido, surgirán las órdenes de medición con la frecuencia fijada. En el caso de que en alguna medición se visualice una alerta sobre algún elemento, se deberá notificar al responsable de mantenimiento y decidir una solución al problema detectado.



CONCLUSIONES



A la hora de implementar un plan de mantenimiento como el detallado en este trabajo se debe comenzar detectando los puntos del proceso en los que se pueda obtener una mayor ganancia con la instalación de algún sistema de medición de condiciones. Primeramente, deben identificar principalmente elementos cuyo fallo imprevisto revierta consecuencias dramáticas sobre la producción de la factoría. En segundo lugar, también son candidatos a la implantación de estas tecnologías aquellos elementos cuyos costes de reparación se agraven debido a la detección tardía del fallo.

Se debe tener en cuenta que la instrumentación necesaria para la medición resulta muy costosa, aún más en extensas líneas de producción con múltiples elementos a controlar. Por esto se tienen que buscar elementos cuyo control asegure importantes ganancias económicas. De lo contrario, la inversión en mantenimiento condicional podría no resultar rentable. Se deben buscar elementos cuyo deterioro progresivo va agravando la degradación del mismo elemento o afecta a otros elementos del mismo equipo. En estos casos, una detección precoz del defecto evita complicaciones derivadas de este fallo inicial. Problemas que se pudieran resolver con un simple cambio de una pequeña pieza, a veces desencadenan en el cambio del elemento completo o de piezas de mayor valor económico. En casos de instalaciones con máquinas únicas y críticas esto resulta mucho más evidente (industrias de tratamiento químico típicamente).

Si resultase que la instrumentación necesaria no es excesivamente costosa, el estudio de los candidatos al control condicional sería menos restrictivo. El coste de instrumentación dependerá de la característica que se desee medir y la precisión que se necesite en la medida.

El mantenimiento condicional actúa como herramienta de control que alerta del fallo de elementos. Pero su implementación total conlleva la consecución de un mantenimiento predictivo, el cual no se detiene en la anticipación sino que despliega un estudio de las causas de los defectos que se detectan. Esta segunda fase complementaria, pero indispensable, implica un conocimiento profundo de las instalaciones y resulta el verdadero frente de ataque contra las averías.

El primer estadio busca anticipar los fallos inesperados de los elementos, para mejorar el rendimiento de la maquinaria y reducir los costes.

El segundo nivel trata de identificar las causas de raíz que son responsables de los defectos detectados. Sin una localización precisa de los defectos resulta imposible la identificación de las causas raíz.

El último paso es la erradicación de las causas identificadas con modificaciones relativamente importantes en el proceso y en las condiciones de operación. Esta fase conlleva el fin de las averías sobre el elemento, es el mantenimiento de más alto nivel y se denomina mantenimiento proactivo.

La evolución de los sistemas de mantenimiento marca la madurez de las empresas, pasando del primitivo mantenimiento correctivo o paliativo al sistema preventivo para alcanzar el mantenimiento condicional, predictivo y proactivo.



Resulta clave tener claro lo que se quiere controlar en cada caso, motivado siempre por la relación de la magnitud con la degradación del elemento. Tras la experiencia se concluye que la implantación de este tipo de procesos en la industria actual conlleva un extenso estudio de viabilidad y su introducción se debe llevar a cabo paulatinamente para asegurar la rentabilidad de la inversión. La prudencia a la hora de realizar estas instalaciones a gran escala es sumamente importante. Una excesiva precipitación puede llevar a resultados erróneos y al fracaso del sistema. El desarrollo paso a paso, la experimentación exhaustiva y el estudio previo son partes indispensables en el proceso de implantación.

Se identifica como punto clave de mejora del sistema la concienciación del personal de mantenimiento para la documentación de las intervenciones realizadas a raíz de mediciones de condiciones. Este punto resulta imprescindible para determinar si las mediciones de condiciones son útiles o no. Incluso, sirve para orientar las mediciones hacia los elementos con fallos más recurrentes. Además de proporcionar una estimación de los ahorros realmente obtenidos a raíz de la implantación de las tecnologías predictivas.

Para conseguir competir con otras plantas de otros continentes resulta obligatorio mejorar la fiabilidad de las instalaciones europeas, el avance en el nivel de mantenimiento es uno de los puntos fuertes de nuestras factorías. No obstante, requiere un salto de calidad para que se consiga alcanzar el nivel de mantenimiento proactivo, en el cual se erradiquen las causas raíces de los fallos más recurrentes.

BIBLIOGRAFÍA



AKTÜRK N., GOHAR R. (1998). **Vibrations associated with ball bearings**. ImechE, Conference Transactions, Multi-Body Dynamics. December 10- 11 No.13, 43-64.

CANADA R., PIETY K., ROBINSON J.C. (1998). **New Methodology for bearing fault defect: peakvue analysis**. Application Paper, Computational System Incorporated. (CSI).

HARRIS T. (1966). **Rolling bearing analysis**. New York: John Wiley and Sons.

SAAVEDRA P. (1998). **Análisis de vibraciones de máquinas rotatorias (Nivel III)**. Cap 4. 10-17. *Universidad de Concepción*.

TANDON N., NAKRA B. C. (1992). **Vibration and acoustic monitoring techniques for the detection of defects in rolling element bearings – a review**. *The Shock and Vibration Digest*. Vol. 24 (3), 3-11.

BRIAN W. (1999). **Intelligent building care, Facilities, Volume 17 · Number 5/6, pp. 189–194**.

EL-HARAM, M.A., AND HORNER, R.M.W. (2002). **Journal of Quality in Maintenance Engineering, Vol. 85 No.2, pp. 135-143**.

HORNER, R.M.W., EL-HARAM, M.A., AND A.K. MUNNS (1997). **Building maintenance strategy: a new management approach, Journal of Quality in Maintenance Engineering, Vol. 3 No. 4, pp. 273-280**.

HOLMBERG K, KOMONEN K, OEDEWALD P, PELTONEN M, REIMAN T, ROUHIAINEN V, TERVO J, HEINO P (2004) **Safety and reliability technology review. Res Rep BTUO43-031209. VTT Industrial Systems, Espoo**

TU PYL, YAM R, TSE P, SUN AOW (2001) **An integrated maintenance management system for an advanced manufacturing company. Int J Adv Manuf Technol 17:692–703**

ARIAS-PAZ M. (2006). **Manual de automóviles. Madrid: Cie, Edición; 56ª. ed.**



