

IMPLEMENTACION DE UN SISTEMA DE MANTENIMIENTO POR DIAGNOSTICO A BORDO DE UNIDADES NAVALES Y MARITIMAS

Daniel Osorio Olave *

"Implementation of a Diagnosis Maintenance System on Board of Naval and Merchant Vessels".

In order to reduce the cost of maintenance, the Chilean Navy has been introducing a Predictive Maintenance System, also called Diagnosis Maintenance System. This type of maintenance uses different Mechanical Analysis Techniques. The most popular being vibration analysis, wear particle analysis and performance monitoring. The experience of several years of working, have lead us to the conclusion that the Diagnosis Maintenance System should be used as a part of the maintenance system, and the correct implementation of the Techniques are the main requirement to achieve the successful of the process.



Introducción.

La Armada de Chile ha estado implementando un Sistema de Mantenimiento Predictivo o por Diagnóstico desde principios de esta década. En este sentido se han

efectuado esfuerzos de carácter técnico y administrativo que a la fecha han dado óptimos resultados en el proceso de mantenimiento, ocasionando una disminución de los costos totales invertidos en el sostenimiento de la flota.

El objeto del presente artículo, es dar a conocer de una forma sencilla el campo de acción de este sistema de mantenimiento mostrando sus principales aportes, los requerimientos necesarios para su

incorporación al sistema y las más relevantes experiencias que el autor ha tenido en su implementación, tanto como usuario de él a bordo de unidades navales, como en su calidad de asesor de ingeniería en el área de mantenimiento y diagnóstico a nivel Institucional.

Sistemas de mantenimiento.

Existen en la actualidad diferentes formas de clasificar las estrategias de mantenimiento, la más comúnmente usada es la que se refiere a las causas que originan el llevar a cabo las rutinas de mantenimiento de los equipos y maquinaria. Esta clasificación es la siguiente:

a.- *Mantenimiento Reactivo.* En esta estrategia se permite que la máquina funcione hasta que se produzca la falla. En ese instante se realiza la reparación o reemplazo de ella. Es comúnmente utilizada en equipos

* Capitán de Corbeta. (R.) Ingeniero Naval Mecánico.

electrónicos, donde es difícil hacer un diagnóstico y las fallas se presentan en general en forma aleatoria.

b.- Mantenimiento Preventivo. En esta estrategia se interviene la máquina periódicamente para inspeccionar y reemplazar componentes, aún cuando se encuentre operando satisfactoriamente.

c. Mantenimiento Predictivo o por Diagnóstico.* En esta estrategia de mantenimiento se evalúa la condición mecánica de la máquina y su evolución a través del tiempo, mediante el uso de diversas técnicas de diagnóstico y el estudio de la tendencia de los parámetros operacionales. En base a estas indicaciones, se programan las necesidades de mantenimiento de la maquinaria.

d.- Mantenimiento Proactivo. En esta reciente estrategia de mantenimiento se identifica y corrige la causa primera de las fallas de la maquinaria, tratando de maximizar su vida útil operativo, a través de acciones que modifican sus condiciones de operación.

Es importante señalar, que las estrategias de mantenimiento mencionadas pueden ser adoptadas en forma conjunta en una misma organización, a fin de dar un sistema de mantenimiento que complemente las ventajas comparativas que cada una de ellas posee.

En este sentido, es destacable indicar que en la actualidad el Mantenimiento Preventivo abarca gran parte del mercado, principalmente por ser una metodología consolidada y de la cual se tiene un alto grado de experiencia. Entidades con una gestión de proceso más desarrollada, han adoptado durante la última década un sistema mixto, que considera la ejecución de rutinas de mantenimiento en forma periódica a través del tiempo, las cuales pueden ser modificadas en su periodicidad y alcance dependiendo del diagnóstico y estudio de tendencias que de cada máquina en particular se tenga.

El Mantenimiento Proactivo es producto de una nueva estrategia de mantenimiento que pretende disminuir los costos, a través

de la reducción de la tasa de fallas que presenta la maquinaria. Hoy en día, aún es tema de estudio y su aplicación real en la industria naviera o Marinas de guerra es escasa.

Mantenimiento predictivo.

Generalidades.

El Sistema de Mantenimiento Predictivo o por Diagnóstico debe ser considerado como un complemento al Sistema de Mantenimiento Planificado, comúnmente implementado en las diversas marinas del mundo y en la industria marítima en general.

Es menester señalar, que el ámbito de acción propio de este sistema es el de aquella maquinaria que presenta por su forma de operación un deterioro paulatino de sus condiciones de funcionamiento. Singular importancia recae sobre las máquinas rotatorias y recíprocas, que masivamente se encuentran instaladas en unidades navales y marítimas.

El auge que el Mantenimiento Predictivo ha tenido en los últimos años, es consecuencia directa del ahorro de recursos que se alcanza una vez que éste se encuentra consolidado al interior de la empresa. En este sentido, existen estudios realizados en Estados Unidos que hablan de una reducción cercana al 30% de los costos en mantenimiento, cuando esta estrategia ha sido incorporada a una organización que mantenía un sistema de mantenimiento basado en el tiempo.

En la figura 1 es posible apreciar un gráfico comparativo de los costos en US\$/HP/Año para las diferentes estrategias de mantenimiento.

Ciclo del Mantenimiento Predictivo.

Objeto tener una mayor claridad respecto a la forma de trabajo que posee el Sistema de Mantenimiento Predictivo, se detallará su ciclo de operación general en base al gráfico mostrado en la figura 2.

a.- La máquina deberá ser periódicamente monitoreada a través de

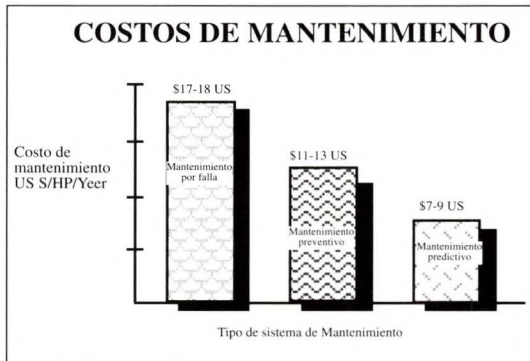


Figura 1.

las diferentes Técnicas de Diagnóstico que se hayan definido e implementado para su análisis.

b.- Los parámetros medidos serán comparados con las alarmas de operación previamente definidas. Si el límite no es excedido se continuará el monitoreo de las variables con la periodicidad establecida. En caso contrario, si la máquina presenta valores de parámetros por sobre los límites establecidos se deberá efectuar un análisis del problema.

c.- El análisis, que deberá ser efectuado por personal idóneo, tanto por sus conocimientos en la máquina como en las técnicas de diagnóstico, definirá la necesidad

de incrementar los intervalos de medición o de programar una reparación.

d.- Si el análisis ha definido la necesidad de efectuar la reparación de la máquina, ésta se llevará a cabo de acuerdo a lo programado. Una vez ejecutado el trabajo será necesario tomar una nueva medición de parámetros, a fin de evaluar el óptimo funcionamiento de la máquina y que éstos se constituyan como "línea base" (referencia) del futuro estudio de tendencias.

e.- Por último, la máquina volverá a su monitoreo periódico, hasta que se produzca una nueva alarma operacional.

Requisitos básicos para la implementación del sistema.

La experiencia ha demostrado, que el Sistema de Mantenimiento para su óptimo funcionamiento requiere ser implementado cumpliendo ciertos requisitos básicos; entendiéndose como básicos, que ellos son fundamentales para alcanzar un mínimo nivel de confiabilidad del sistema y que asegure un adecuado nivel de mantenimiento de la maquinaria. El no cumplimiento de alguno de estos requisitos, motivará un análisis superficial y en oportunidades erróneo, que tendrá como consecuencia un aumento de los costos, ya sea por efectuar reparaciones innecesarias o inadecuadas, como por estar expuesto a fallas progresivas del material, que en oportunidades tendrán consecuencias catastróficas.

Estos requisitos o requerimientos pueden ser definidos como sigue:

a.- Estudio de la organización definiendo necesidades, capacidades y sistema de administración interna. En suma conocer la estructura interna en la cual se implementará el sistema.

b.- Creación de la orgánica técnico-administrativa con la cual trabajará el sistema, definiendo las responsabilidades del personal de la organización. Lo anterior se considera prioritario, pues gracias a esta etapa se establecerán los requerimientos humanos y materiales.

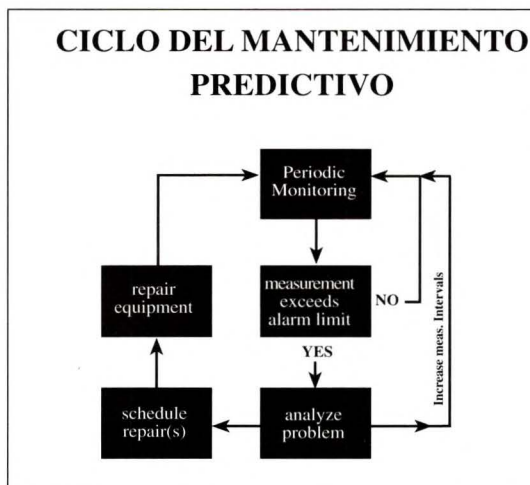


Figura 2.

e.- Análisis de la maquinaria, definiendo técnicas de diagnóstico y forma de aplicación de ellas. En este sentido, es menester señalar que las técnicas a implementar serán analizadas para cada máquina en particular, ya que las características propias de ella determinarán la mejor forma en las que pueden ser analizadas.

d.- Capacitación del personal acorde a sus funciones en el proceso de mantenimiento. Será necesario definir los perfiles profesionales de cada integrante de la organización, a fin de determinar la capacitación requerida por cada uno de ellos. Hincapié se debe hacer en señalar la necesidad de contar con personal idóneo en el análisis y diagnóstico de la maquinaria, debiéndose resaltar la gran importancia que posee la experiencia en su rendimiento profesional.

e.- Adquisición de equipamiento que permita la óptima implementación del sistema. Especial cuidado se deberá tener en las capacidades de los equipos y en su adecuada compatibilidad con el equipamiento computacional existente en la organización.

Técnicas de diagnóstico.

Generalidades.

Las Técnicas de Diagnóstico pueden ser definidas, como todas aquellas pruebas, mediciones y tratamientos de la información, que trabajando dentro de una normativa y bajo un sustento teórico y práctico, permiten conocer la condición de una máquina en tiempo presente y prever su estado futuro.

Especial atención se debe sindicar a la experiencia que avala el uso de estas técnicas y cómo ellas son el resultado de largas investigaciones de carácter empírico. De esta forma, es sencillo vislumbrar que su óptima utilización dependerá en forma importante de la experiencia del analista. Su conocimiento de la técnica, más el que posea de la máquina a analizar, serán sin duda el mejor aval que se tenga para asegurar un acertado diagnóstico.

En la actualidad, las Técnicas de Diagnóstico más conocidas son el Análisis de Vibraciones, el Análisis de Aceite Lubricante y el Análisis del Rendimiento Operacional. Existen otras pruebas o mediciones factibles de ser realizadas, pero que a juicio del auto pueden ser de alguna forma introducidas al Análisis del Rendimiento Operacional, entre otros destaca el referido a la emisión de radiación.

El estado de implementación de estas técnicas a nivel internacional no se encuentra plenamente consolidado, y si bien el análisis de vibraciones es masivamente utilizado, su estructuración como parte de un sistema de mantenimiento aún posee deficiencias, tanto en los aspectos de carácter teórico como aquellos propios de la ejecución práctica.

Tipos de técnicas de diagnósticos.

a. Análisis de Vibraciones.

Esta técnica es sin lugar a dudas la que más utilidad ha presentado a los analistas desde sus orígenes. La teoría y experiencia acumulada a través del tiempo han dado como resultado un importante grado de aciertos, mediante lo cual se ha prestigiado la técnica y masificado su uso. Adicionalmente a lo indicado, ha jugado un papel de importancia el bajo costo relativo de los equipos de medición con respecto a la reducción de los costos de mantenimiento.

Por ser esta técnica, la que en mayor medida se utiliza en las Armadas y empresas navieras del mundo es que será tratada con mayor detención en párrafos posteriores.

b. Análisis de Aceite.

En primer término es necesario destacar, que los ensayos que se le practican al aceite, en virtud de conocer el estado del mismo, difieren de aquellos efectuados a fin de establecer la condición de operación de la maquinaria y que son los propios que utiliza el Mantenimiento Predictivo. No obstante lo anterior, es posible y de hecho así sucede, que un mismo test pueda ser utilizado en ambas funciones.

La idea general de esta técnica, es la de controlar las variables más significativas de los ensayos de aceite lubricante. En este sentido, destacan las propias de los ensayos físico químicos, siendo de gran utilidad los parámetros de dilución por combustible y el contenido de agua; y por otro lado los relativos a los ensayos metalográficos, que muestran la acumulación de trazas metálicas producto del desgaste de los componentes internos de la maquinaria. Como es obvio, se deberán controlar los metales que estén presentes en los componentes más susceptibles a desgaste de la máquina; para motores Diesel son de típico interés: el cobre (casquetes eje cigüeñal y balancines, enfriadores), fierro y cromo (anillos y camisas), plomo (casquetes del eje cigüeñal) y níquel (vástagos de válvulas).

En relación, a los valores máximos de aceptación de trazas metálicas en el aceite lubricante, estos se referirán a la razón de desgaste por intervalo de tiempo, de esta forma el estudio de tendencias se hace fundamental para el correcto diagnóstico de la maquinaria. En otras palabras, no serán de relevancia en general los valores puntuales de contenido de trazas metálicas, sino el aumento relativo de ellas a través del tiempo. Por tanto, el determinar las tasas de desgaste aceptables para cada metal y cada máquina en particular será un trabajo de relevante importancia y que deberá ser abordado en las primeras etapas de la implementación de esta técnica. Es importante señalar, que sólo deberán ser consideradas dentro del estudio de tendencias, aquellas muestras que sean representativas. Atención deberá tenerse con las condiciones de orden operacional a las que estuvo sometido el aceite.

En la actualidad existen variados equipos para determinar la concentración de partículas metálicas en el aceite, siendo importante señalar que ellos se diferencian principalmente por el método de atomización de la muestra.

La espectroscopía atómica se basa

fundamentalmente en la absorción u emisión de átomos o iones elementales. Los espectros atómicos se obtienen mediante un adecuado tratamiento térmico que convierte los componentes de una muestra en átomos o iones elementales gaseosos. La emisión u absorción de la mezcla resultante sirve para la determinación cualitativa o cuantitativa de uno o varios de los elementos presentes en la muestra. La precisión y exactitud de los métodos atómicos dependerán en gran medida de la etapa de atomización y por tanto en la elección de equipo se deberán tener presente los requerimientos antes señalados.

No obstante lo anterior, el aspecto que en mayor medida se deberá considerar al momento de adquisición del equipo es el número de muestras que se requiere analizar en un período de tiempo. Los equipos varían su rapidez de proceso, dependiendo del método de atomización con que ellos trabajan y producto de la disposición y forma de trabajo del equipo. No siempre será necesario contar con un equipo de alta rapidez de proceso, el encargado de analizar esta adquisición de alto costo, deberá tener en consideración las reales necesidades de la organización, teniendo si especial atención en las que se puedan prever a futuro.

c. Análisis del Rendimiento Operacional.

Debe entenderse como aquella técnica que controla los más representativos parámetros de operación de la maquinaria, ya que éstos son un reflejo indirecto del rendimiento operacional de la misma. Es menester señalar, que la definición de los parámetros a ser controlados será una tarea prioritaria en este sentido y que su buena elección repercutirá notablemente en la eficiente implementación de esta técnica.

En otro aspecto, es importante que el estudio de tendencias que se efectúe de los parámetros operacionales considere a la máquina en un régimen estable y sin variaciones a través del tiempo. Mediciones en estado transiente y efectuadas a diferentes

solicitudes que la previamente determinada no deberán ser considerados en el estudio de tendencias.

La automatización en el monitoreo de la maquinaria y el uso de software de análisis serán de gran utilidad, sobre todo si se considera el alto número de datos necesarios de ser procesados. En la actualidad, las centrales de control de máquinas existentes en unidades navales poseen sistemas de almacenamiento de información, con la flexibilidad suficiente para que el usuario pueda definir sus procesos de control.

Por último, es necesario destacar que el uso de datos iniciales de operación, cuando la máquina está nueva o recién reacondicionada, prestará una importante utilidad, ya que servirá como referencia para determinar su degradación a través del tiempo.

Análisis de vibraciones.

Objeto dar un mejor entendimiento del Mantenimiento Predictivo, a continuación se especificará en mayor profundidad la Técnica de Análisis de Vibraciones, que a saber reúne las más altas capacidades de análisis.

Conceptos Básicos de Analisis.

Una vibración mecánica se define como el movimiento oscilatorio de una máquina, de una estructura o de una parte de ellas, alrededor de su posición original de reposo. Siendo una de las formas más simples de vibración el movimiento armónico, el cual puede ser obtenido cuando se hace vibrar libremente un sistema masa resorte como se muestra en la figura 3.

De la figura mencionada, es posible definir la mayoría de los conceptos frecuentemente usados en el análisis de las vibraciones. Se destacan entre otros los conceptos de: desplazamiento, velocidad y aceleración vibratorio, frecuencia devibración y diferencia de fase.

La teoría de vibraciones, acompañada de ensayos experimentales, ha logrado

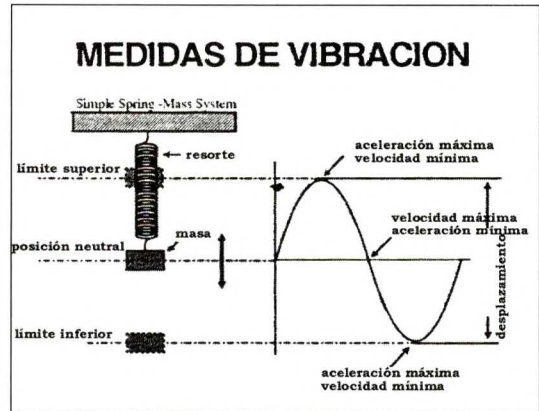


Figura 3.

establecer relaciones entre el estado vibratorio de una máquina y su condición mecánica. En este sentido, se ha podido constatar que la señal vibratorio, es en general difícil de analizar en el dominio del tiempo, (forma de onda o de la vibración en el tiempo), de aquí que sea necesario su análisis en el dominio de la frecuencia. Se entiende por ello, a la descomposición de una vibración global proveniente de diferentes fuentes de excitación, en sus componentes que la conforman.

De esta manera, como se muestra en la figura 4, se ha podido definir la relación existente entre los espectros vibratorios y las probables fallas en desarrollo. Es importante señalar que la tabla mostrada debe ser considerada sólo como un apoyo para el análisis, ya que el diagnóstico de la falla requerirá frecuentemente de un estudio más profundo.

Evaluación de la Severidad Vibratoria.

La severidad de una vibración debe ser definida respecto al daño específico que ella pueda generar. De esta forma, las razones porque se establecen límites para las vibraciones, son de dos tipos:

a.- Límites absolutos son establecidos para avisar de condiciones que podrían resultaren fallas de la maquinaria o elementos asociados.

Anexo A.

1. Tabla de Frecuencias de Vibración relacionadas a Fallas Mecánicas

FRECUENCIA	CAUSA POSIBLE	COMENTARIOS
	DESBALANCEAMIENTO	Amplitud constante, desfase $\approx 90^\circ$ entre vibraciones horizontal y vertical, predominante radial (rotore en valadizo pueden tener vibraciones axiales altas).
1 x RPM	DISTORSIÓN DE LA CARCAZA	Distorsión causa vibraciones indirectamente generando desalineamiento, roces o contacto desigual en los descensos. Vibración direccional.
	RESONANCIAS DEL EJE (velocidad crítica, carcasa soportes, fundación)	Similar al desbalanceamiento. Amplitud disminuye rápidamente con pequeños cambios de velocidad.
	EXCENRICIDAD DE DESCANSOS	Similar al desbalanceamiento. En correas produce vibraciones unidireccionales.
	DESALINEAMIENTO O EJE FLECTADO	Altos niveles vibratorios axiales, $\approx 180^\circ$ diferencia de fase en los extremos de los ejes. Generalmente caracterizado por significativo valor a 2x.
	PROBLEMAS ELECTRICOS	En general se producen a la frecuencia de la línea (ejemplo, barra rota en motor de inducción). La vibración disminuye bruscamente con el corte de corriente.
	POCO CAUDAL EN BOMBAS	Amplitud alta que puede variar.
2 x RPM	SOLTURA	Máquina suelta que permite un movimiento de vaivén. Movimiento impulsivo o truncado genera gran cantidad de armónicos.
	DESALINEAMIENTO	Vibraciones axiales significativas.
	DESBALANCEAMIENTO	En algunos sopladores o ventiladores en voladizo con desbalanceamiento de cupla.
3 x RPM	SOLTURA	Rodamiento con juego excesivo y desbalanceamiento de cupla combinados.
	DESALINEAMIENTO	Generalmente por desalineamiento y juego axial excesivo (soltura) combinados.
MENOS DE 1 x RPM (SUBARMONICOS)	MOVIMIENTO GIRATORIO DEL ACEITE (Oil whirl)	Típicamente $0,43 \div 0,48x$. Fase inestable.
	CORREAS DEFECTUOSAS	Típicamente 1, 2, 3 y 4 veces las RPM de la correa.
	SOLTURAS DE LA MAQ.	En caso de soldaduras severas, $1/2x$, $1/3x$ pueden encontrarse.
VARIAS VECES LAS RPM (ARMONICOS)	ENGRANAJES	Frecuencia de engrane = N° de dientes x RPM y armónicos.
	FUERZAS AERODINAMICAS E HIDRAULICAS	Frecuencia de paso de los álabes = número de dientes x RPM armónicos
FECUENCIAS SIN RELACION ARMONICA	RODAMIENTOS	Defectos en pistas ext. e int. generan vibr. $a \approx 0,4$ y $0,6$ veces el número de elementos rodantes x RPM.
	CAVITACIÓN, FLUJO TURBULENTO	Excita resonancias de algunos elementos.
	ROZAMIENTOS	

Figura 4.

b.- Límites para el cambio en los valores son establecidos para proveer un aviso temprano de variaciones anormales.

Los organismos internacionales que regulan los estándares de severidad vibratorio son múltiples, sin embargo sus normativas pueden ser en la práctica consideradas equivalentes. Se destacan entre otras: ISO 2372, ISO 3945, VDI 2059, VDI 2063, ISO 2373 e ISO 2361/1.

En forma general es necesario destacar que el parámetro de Velocidad Vibratoria es el que frecuentemente se utiliza para determinar el nivel de severidad vibratorio.

Tendencias Vibratorias.

Las tendencias de los niveles vibratorios tienen relevante importancia cuando nos referimos al Mantenimiento Predictivo, pues es justamente su monitoreo el que facilita el prever las fallas futuras de la maquinaria y con esto llevar a cabo una óptima programación de las reparaciones. En la figura 5 se muestra el típico gráfico de tendencias vibratorias.

En el estudio de tendencias se debe considerar lo siguiente:

a. Fijar y mantener las condiciones a las cuales se tomarán las vibraciones a través del tiempo.

b. Mantener una adecuada periodicidad de la toma de vibraciones.

c. Elegir el parámetro de monitoreo según condiciones de operación de la máquina.

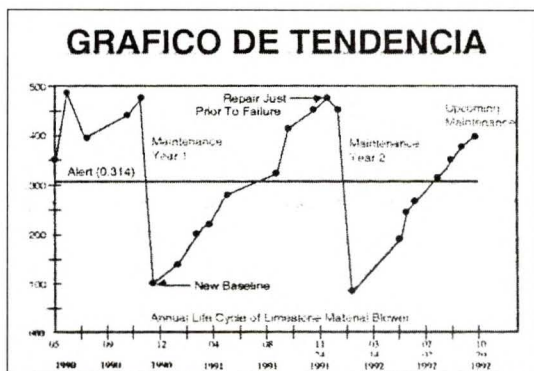


Figura 5.

d.- Efectuar proyección de niveles vibratorios, de acuerdo a experiencia que se tenga de la máquina en particular.

Experiencias y Recomendaciones Finales.

Las principales experiencias de orden general, que pueden ser mencionadas, son las siguientes:

a. La incorporación del Mantenimiento Predictivo en la organización produce un importante impacto en el sistema, debiéndose prever un inicial rechazo por parte de un número a veces no despreciable de integrantes del sistema técnico-administrativo.

b. Se debe evitar desprestigiar las técnicas de análisis a través de un diagnóstico superficial, que pueda traer consigo inapropiadas decisiones técnicas. La

capacitación del personal analista se estima prioritaria.

c. Las normativas técnicas al interior de la organización deben ser estandarizadas explícitamente y divulgadas apropiadamente a todos sus integrantes.

d. El Mantenimiento Predictivo no representa por sí solo la solución integral del Sistema de Mantenimiento y por tanto su aplicación debe estar inserta en una estrategia general de mantenimiento.

e. El Mantenimiento Predictivo posee riesgos al ser implementado, en lo referente al diagnóstico y la predicción de fallas. Lo anterior, debe ser de pleno conocimiento de todos los integrantes de la organización, de no ser así podrían formarse falsas expectativas, que al producirse eventuales fallas de predicción o diagnóstico traerían como consecuencia la pérdida de confianza en el sistema y con ello un posible fracaso en su puesta en marcha.

Sin lugar a dudas, el tema del Mantenimiento Predictivo es mucho más amplio de lo expresado en estas líneas y por lo mismo no ha sido la intención de este artículo el profundizar en algún tópico en particular. Sólo se ha pretendido, a través de una síntesis conceptual, el entregar la experiencia que el autor ha recogido a través de los años de trabajo en el área del diagnóstico de maquinaria.

BIBLIOGRAFIA

- Directiva Direceng 74-02.B, Armada de Chile; "Mantención Sintomática Mediante Medición de Vibraciones".
- Pedro Saavedra, Universidad de Concepción de Chile; "Análisis de Vibraciones en Máquinas Rotatorias".
- Normas Técnicas Internacionales MIL STD, ISO y VDL.
- Curso de Análisis de Vibraciones, SKF.
- Pedro Albarracín, "Tribología y Lubricación Industrial y Automotriz".
- Lloyds Register of Shipping, "Rules and Regulation for the Classification of Ships".