

UNIVERSIDAD DE CIENFUEGOS
FACULTAD DE INGENIERIA



Trabajo de Diploma

**Título: Diseño y Practica metodológica para la introducción en el
Mantenimiento por Diagnóstico los límites de severidad de las vibraciones a
partir de valores históricos en la ETE Cienfuegos.**

Autor: Yariovi Armas Rodríguez

Tutores:

Ing. Jesús Ernesto del Junco García

MSc Ing Silvino Chaviano

Año 58 de la Revolución



Agradecimientos

A toda mi familia por el apoyo que me han brindado

A la revolución por brindarme la posibilidad de estudiar y convertirme en un profesional

Agradezco especialmente a mi Tutor Silvino Chaviano Bernal que con su ingenio se logró la materialización de este trabajo.

Dedicatoria

A mi madre y padre por guiarme por el buen camino, a mi abuela Juana que siempre me ve con orgullo y a todas aquellas personas que de una forma u otra han colaborado en mi formación como profesional, a mis familiares y amigos.

A todos ellos

Muchas Gracias

Resumen

En la actualidad son conocidas las variaciones que presentan los valores vibracionales de la Turbina 3, dado la condicionante de ausencia de un mantenimiento Capital con más de 5 años de lo recomendado por el fabricante. La existencia de una medición en tiempo real del parámetro vibraciones, constituye un elemento básico en la explotación de las turbinas, u otros equipos fundamentales. Pero el problema fundamental lo constituye la valoración de los límites de severidad del estado vibracional. Para cuyos efectos contamos en ocasiones con los recomendados por fabricante, a los más usuales las normas ISO como la 10816 muy eficaz para estos menesteres.

El montaje del VCM 4000 trajo consigo un estudio de los límites iniciales atendiendo al estado de máquina en aquel instante. Cuyos valores quedaron registrado como límite 1 y límite 2, a partir de los cuales nos orientamos para conocer posibles cambios o probables desarrollo de defectos que su poco control puede acarrear una avería de pérdidas incalculables.

Con este trabajo presentamos una metodología de los posibles pasos a seguir para poder variar los comprometedores valores de los límites de vibraciones, cuya aplicación a permitido continuar explotando las turbinas y otros equipos en planta, teniendo en cuenta dos aspectos elementales, posibles causas de los cambios vibracionales y análisis de probabilidad de fallos, comportamiento histórico del parámetro objeto a cambios. Representando el mismo un efecto económico viable ya que ha permitido mantener en producción nuestro sistema a pesar de los cambios, además debemos destacar la confiabilidad y seguridad operacional que representa para aquellos que operan y se orientan por los límites de estado predeterminados.

Summary

As of the present moment the variations that present the moral values are known of the Turbine 3, die the contributing factor of absence of a Capital maintenance with over 5 years of what recommended for the manufacturer. The existence of a measurement in real time of the parameter vibrations, a basic element in the exploitation of turbines constitutes, or other fundamental teams. But the fundamental problem is constituted by the been vibracional evaluation of the limits of severity. For whose effects we had at times protégés for manufacturer, to the more usual standards ISO like the 10816 very efficacious for these necessities.

The set-up of the VCM a study of limits brought 4000 along initiate them attending to the status of machine in that instant. Whose moral values were 1 and limit searchedly like limit 2, the ones that we guided ourselves as from to know possible changes or probable development of defects than his little a damage of incalculable losses can put face to face control.

With this work we presented a methodology of possible steps to follow to be able to vary the compromising moral values of the limits of vibrations, whose application to allowed continuing exploding the turbines and another teams in plant, taking into account two elementary aspects, possible causes of changes vibracionales and analysis of probability of failures, historic behavior of the parameter I object to changes. Representing the same an effect cheap to run viable since it has permitted maintaining in production our system in spite of changes, besides we must highlight the reliability and operational certainty that the fact that they operate and they get their bearings for the limits of status predetermined represents for those.

ÍNDICE

Índice.....	6
CAPITULO I. Valoración técnica de la organización del mantenimiento en la Central Termoeléctrica CMC de Cienfuegos.....	13
1.1 SITUACIÓN ACTUAL DEL MANTENIMIENTO EN LA INDUSTRIA.	13
1.2 Formas organizativas de sistemas de mantenimiento actuales.	13
1.2.1 Mantenimiento Flexible o Combinad.....	14
PREDICTIVO	14
PREVENTIVO	14
REACTIVO	14
1.2.3 El mantenimiento Reactivo	15
1.2.4 El mantenimiento Preventivo Planificado	15
1.2.5 El mantenimiento Predictivo	15
1.2.6 El mantenimiento Total Productivo.....	16
1.3 El Diagnóstico en el mantenimiento.....	16
1.4 Diagnóstico de fallas o averías	16
1.4.1 Los objetivos básicos del diagnóstico de falla o avería.....	16
1.5 El mantenimiento dentro del proceso productivo.....	17
1.6 Característica actual de la entidad	18
1.7 Situación actual y perspectivas de desarrollo	19
1.8 Principales Producciones y Significación Social.....	20
1.9 Características del objeto de estudio. Principio de funcionamiento de la Central Termoeléctrica.	20
Conclusiones Capitulo 1	22
CAPITULO II. Conceptos y terminologías relacionada con el parámetro síntoma Vibraciones Mecánicas.	24
2.1 Concepto básico de vibraciones	24
2.2 Terminologías asociadas a las vibraciones	24
2.2.1 Por vibración Horizontal	25
2.2.2 La vibración radial	25
2.2.3 La vibración axial,	25
2.2.4 El plano de la medición	25
2.2.4 Amplitud.....	25
2.2.5 Frecuencia.....	25
2.2.6 Desplazamiento	26
2.2.7 Velocidad.....	26
2.2.8 Velocidad Efectiva	26
2.2.9 Aceleración.....	26
2.2.10 Fase.....	26
2.2.11 Frecuencia.....	26
2.2.12 Vibraciones de Frecuencia Rotacional (1N).....	26
2.2.13 Vibraciones de baja frecuencia.....	27
2.2.14 Vibraciones de alta frecuencia.....	27
2.3 Aplicación en la industria del parámetro vibraciones	27
2.4 Aspectos prácticos en la medición de Vibración.....	29
2.4.1 Ubicación de los Puntos de Prueba	29

2.5 Vibraciones absolutas y relativas en eje. Componentes de la dirección de las mediciones.....	30
2.5.1 Vibraciones absolutas	30
2.5.2 Vibraciones relativas en eje.....	31
2.6 Instrumentos y técnicas para medición y análisis de vibraciones	32
2.6.1 Requisitos de la medición y análisis de vibraciones.....	32
2.6.2 Herramientas para medición y análisis de las vibraciones.	33
2.6.3 Tipos de Transductores de vibración.....	33
2.6.3.1 Por inducción electromagnética. Transductores de velocidad	33
2.6.3.1 Por efecto piezoeléctrico. Transductores de aceleración	34
2.6.3.3 Por corrientes parasitas Transductores de desplazamiento.....	34
2.6.3.4 Transductores de desplazamiento.....	34
2.7- Normas de vibraciones ISO 10816/96 vibraciones absolutas y relativas.....	37
2.7.1 Evaluación de la severidad de las vibraciones,.....	37
2.7.2 Zonas de evaluación de acuerdo a la norma DIN ISO 7919:	40
2.7.3 Algunos criterios para Medición y Evaluación	41
2.7.4 VALORES PATRONES Y VALORES BASES DE FRECUENCIA.....	41
Conclusiones Capitulo 2.....	41
CAPITULO 3. Diseño de metodología practica para los cambios paulatinos en la aplicación de las normas de severidad de las vibraciones ISO 10816-3 por valores patrones históricos.....	43
3.1 GENERALIDADES.....	44
3.1.1 Generalidades del equipo objeto de estudio.	44
3.2 Base de Datos para el control y análisis de los parámetros de muestreo.....	45
3.2.1 Datos del monitoreo periódica de las vibraciones	46
3.2.2 Datos de mediciones y análisis de tendencia para la valoración práctica de la metodología tomando como ejemplo la turbina 3.	47
3.3- Análisis causa efecto, para valorar técnicamente los posibles cambios en los límites.	50
3.3.1 Defectos mecánicos	50
3.3.2 Defectos operacionales	51
3.4 Análisis de resultados espectrales, análisis de la señal en el tiempo y las fases de las vibraciones.....	51
3.5 Análisis de posibles defectos. Valoración de los cambios de límites. Vibraciones absolutas y vibraciones relativas.	54
3.5.1 Análisis espectral. Vibraciones absolutas en chumacera.....	55
3.6 Niveles totales y Análisis espectral de Vibraciones relativas en eje.	57
3.7 Análisis de posibles causas. Espectro en chumaceras.	58
3.8 VALORACION TEORICA ECUACIONES EVALUATIVAS DE LOS LÍMITES CONDENATORIOS DE LOS NIVELES DE VIBRACIONES	60
3.9 EVALUACION PRÁCTICA.	62
3.10 Calculo de valor de cambio de vibraciones absolutas en CH3.....	63
3.11 Calculo de valor de cambio vibraciones relativas CH3.....	65
3.12 Variación de los límites de vibraciones Absoluta y Relativo en eje CH3.....	67
Recomendación:	68
3.13 Criterios de aceptación de los límites	68
Conclusiones:	72

CAPITULO 4. RESULTADOS TÉCNICO-ECONÓMICO OBTENIDOS A PARTIR DE LA APLICACIÓN DEL SISTEMA DE MANTENIMIENTO BASADO EN LA CONDICIÓN.....	74
INTRODUCCIÓN.....	74
4.1 Resultados Técnico-Económico del comportamiento de las Averías.	74
4.1.1 Análisis Comparativo de las Averías producidas en ambos períodos	74
4.1.2. Ganancias Bruta por disminución de la Energía Indisponible (E.I).	76
4.2 Inversiones realizadas durante la introducción de la metodología de cambio de límites de severidad de las vibraciones.....	76
4.3 Cálculo de Ganancia Neta por disminución de la Energía Indisponible por años.	77
Cálculo de la Ganancia Neta.	78
CONCLUSIONES.....	78
Conclusiones Generales.....	79
Bibliografía.....	80
Anexos.....	82

Introducción

Teniendo en cuenta los años de explotación que tienen en la actualidad los equipos rotatorios de la termoeléctrica, las experiencias de trabajo en la temática del mantenimiento, así como las altas tecnologías e instrumentos con que se cuenta para el desarrollo del mantenimiento por diagnósticos, se puede precisar con mayor exactitud la aplicación de las normas para el control de límites de parámetros de estado, a partir de datos históricos y comportamiento en el tiempo de las fallas y averías, de manera que se pueda disponer y explotar con mayor flexibilidad los equipos, que por normas en ocasiones requieren estar fuera de servicio.

Si tenemos en cuenta este enfoque, la realización de un estudio del comportamiento del parámetro vibraciones contra los resultados actuales durante su aplicación en las técnicas del mantenimiento por diagnóstico, a partir de Normas Internacionales ISO 10816-3, así como en otros casos las recomendaciones del fabricante, la aplicación o adecuación de nuestros sistemas al comportamientos históricos del parámetro antes mencionado, debe aportar una mayor fiabilidad y disponibilidad de los equipos al adecuarse el estado actual a las condiciones variables posterior a mas de 30 años de explotación de los equipos.

El **Problema Científico** planteado se puede enunciar como sigue:

Los esquemas de análisis empleados tradicionalmente relacionados con la aplicación de Normas de Severidad de las Vibraciones, requieren de correcciones y adecuaciones a las condiciones actuales del comportamiento del parámetro de síntoma vibraciones, para equipos que rebasan el tiempo de vida útil, para una correcta aplicación de los nuevos enfoques del mantenimiento predictivo proactivo.

.

La identificación de este Problema ha permitido formular la siguiente **Hipótesis**:

Es posible emplear un Esquema de Análisis que rompa con los paradigmas clásicos existentes en este sentido y que permita la adecuada aplicación de nuevas tecnologías asociadas al diagnóstico por vibraciones, para su aplicación en el mantenimiento predictivo, todo ello a partir del estudio del comportamiento de la relación parámetro síntoma vibraciones- causa raíz de los fallos, tomando como base los límites

condenatorios, por normas, recomendación del fabricante y sobre la base de patrones con **valores históricos**.

En el presente trabajo se aspira a demostrar la viabilidad de la Hipótesis formulada para lo cual se ha definido el siguiente **Objetivo General**:

Elaborar los conceptos más generales denominado en este trabajo como: **Realizar un estudio que permita el Diseño y Practica metodológica para la introducción en el Mantenimiento por Diagnóstico los límites de severidad de las vibraciones a partir de valores históricos en la ETE Cienfuegos..**

Los **Objetivos Específicos** del Trabajo son:

- 1- -Realizar una valoración técnica de la organización del mantenimiento en la Central Termoeléctrica CMC de Cienfuegos
- 2- Investigar en la literatura los conceptos y análisis de vibraciones aplicables al mantenimiento basado en la condición.
- 3- Estudio de los sistemas de diagnósticos por parámetros de síntomas aplicados en los Equipos roto dinámicos y trabajos con normas para conocer el estado de los equipos rotatorios.
- 4- Diseñar y proponer una metodología practica para los cambios paulatinos en la aplicación de las normas se severidad de las vibraciones ISO 10816-3 por valores patrones históricos.
- 5- Realizar una valoración técnico-económica de la efectividad de la metodología, que permita justificar los cambios y la aplicación de ella.

CAPITULO I. VALORACIÓN TÉCNICA DE LA ORGANIZACIÓN DEL MANTENIMIENTO EN LA CENTRAL TERMOELÉCTRICA CMC DE CIENFUEGOS

INTRODUCCIÓN.

A lo largo de este capítulo se relacionan las tendencias a nivel Nacional y Mundial de los sistemas organizativo de mantenimiento, y como toma un lugar preponderante dentro de la Gestión del mismo, la terminología mantenimiento por diagnóstico en todas sus posibles aplicaciones en dependencia del desarrollo de nuevas y complejas tecnologías a utilizar.

1.1 SITUACIÓN ACTUAL DEL MANTENIMIENTO EN LA INDUSTRIA.

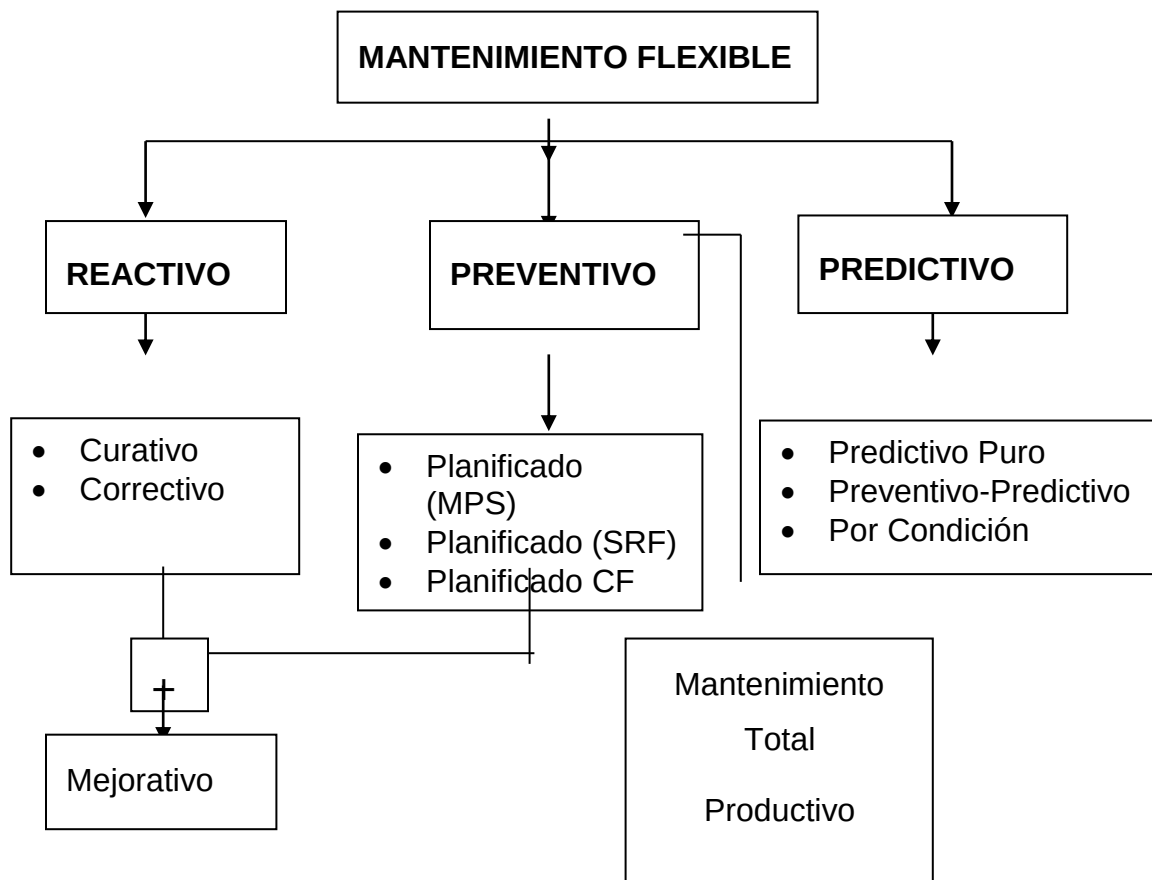
La moderna tecnología proporciona una serie de métodos que permiten una evaluación exterior de las condiciones de máquinas sin desmontajes previos, no afectando así ni su funcionamiento normal, ni el proceso productivo. El método de análisis por vibraciones ha demostrado ser el más efectivo en estos casos. El mismo junto con el monitoreo de otros parámetros específicos de la máquina, constituyen la base del mantenimiento Predictivo y (MPP) según estado, en equipos rotatorios. La práctica mundial está a favor del Mantenimiento Flexible, reforzando en todos los casos su introducción. El mismo se hace más demandado en aquellas industrias en las cuales el personal dirigente va adquiriendo un mayor grado de cultura tecnológica y por su indiscutible contribución a la eficiencia económica de la industria, así como a la seguridad operacional de la misma, se ha colocado en el mismo nivel de prioridad en la inversión que en el monitoreo y control del procesos tecnológicos.

1.2 Formas organizativas de sistemas de mantenimiento actuales.

El diagnóstico y el monitoreo generan información, la cual puede ser utilizada con mayor o menor eficiencia dependiendo de la estructura organizativa del sistema de mantenimiento. Tal es la importancia de este vínculo, que más del 50 % del ahorro que se puede lograr mediante la utilización de las técnicas de diagnóstico dependen del mismo, todo lo cual justifica el análisis integral de la relación entre el sistema de mantenimiento utilizado y los métodos y técnicas de diagnóstico. En la Fig. 1. a continuación, aparece de manera sintetizada la tendencia actual de las formas organizativas del sistema de mantenimiento a aplicar en los diferentes sistemas y equipos de la industria.

1.2.1 Mantenimiento Flexible o Combinado como su nombre lo indica, consiste en la combinación armónica de los diferentes sistemas de mantenimiento a partir de los requerimientos que impone la explotación del parque de máquinas analizado. Es importante el hecho de que carece de fundamento técnico, económico y funcional, tratar de aplicar el mismo sistema de mantenimiento a todas las máquinas de una fábrica. Se debe además resaltar que la característica principal de todas las formas organizativas avanzadas del mantenimiento es que se basan en el conocimiento y evaluación del estado real de la máquina objeto de análisis.

FORMAS ORGANIZATIVAS DE MANTENIMIENTO



SRF: Según recomendaciones del Fabricante

MPS: medición de parámetros de síntomas

CF: Centrado en la fiabilidad

NOTAS

Fig. 1. Formas Organizativas del Sistema de Mantenimiento (*IRD Mechanalysis, Inc, 1998*).

Como se puede observar, en la Fig. 1 se presentan las diferentes variantes que puede adoptar los sistemas de mantenimiento en la industria atendiendo a las características técnicas propias de cada equipo que van desde su construcción, costos de mantenimiento, importancia económica en los procesos productivos, entre otros.

1.2.3 El mantenimiento Reactivo, se divide en dos facetas el Curativo y el Correctivo, que en ambos casos su principio es explotar la máquina sin interrupción hasta la rotura imprevista.

1.2.4 El mantenimiento Preventivo Planificado, parte de la ejecución preventiva de actividades, las cuales en general se planifican en el tiempo a partir de un ciclo teórico de desgaste, es decir es un grupo de servicios de mantenimiento repetitivos como, las revisiones, cambios de piezas, lubricación, otros. Encaminados a prevenir las roturas impredecibles. Esta forma organizada de realizar el mantenimiento puede ser: Según Recomendaciones del Fabricante, planificado según estudios estadísticos (Basado en la Fiabilidad), y atendiendo a la variación dinámica de sus Parámetros de Síntomas.

1.2.5 El mantenimiento Predictivo, cuando se utiliza un nivel de instrumentación superior en el MPS, es posible identificar los defectos en su etapa incipiente así como sus causas, con lo cual se puede predecir el comportamiento de la máquina, de ahí su nombre de mantenimiento Predictivo. Esto permite preparar adecuadamente y ejecutar solo el mantenimiento donde lo requiere el dispositivo. Dentro de este tipo de mantenimiento se destacan : Mantenimiento por condición, este sistema emplea la variante de un proceso de monitoreo y diagnóstico optimizado. Mantenimiento Preventivo Predictivo, se sustenta sobre el principio que todos los elementos que componen un dispositivo no son posibles de diagnosticar al existir defecto que requieren de una acción preventiva.

1.2.6 El mantenimiento Total Productivo, es una nueva filosofía del mantenimiento que lo considera autónomo, el mismo combina la calidad, el mantenimiento, y la producción, es decir hace participé al operario tanto de los problemas técnicos como de su solución. Cambiando el concepto de personal de operación y de mantenimiento por un grupo de trabajo.

1.3 El Diagnóstico en el mantenimiento

La moderna tecnología proporciona una serie de métodos que permiten una evaluación exterior de las condiciones de máquinas sin desmontajes previos, no afectando así ni su funcionamiento normal, ni el proceso productivo. El método de análisis de metales, ha demostrado ser el más efectivo en estos casos. El mismo junto con el monitoreo de otros parámetros específicos de la máquina, constituyen la base del mantenimiento Predictivo y (MPP) según estado, en equipos de calderas

1.4 Diagnóstico de fallas o averías

No existe probablemente en la industria, situación más desagradable que aquella en la que, luego de producirse una falla inesperada en un equipo fundamental, se cuenta solo con informaciones vagas y muchas veces contradictorias de los operadores y unos pocos fragmentos de material sucio para enfrentar las interrogantes de, por que se produjo la avería y qué hacer para que no ocurra de nuevo interrumpido el proceso productivo. Lo anterior ejemplifica claramente la necesidad de crear todo un sistema técnico-organizativo alrededor de esta problemática como única vía para garantizar su solución racional.

1.4.1 Los objetivos básicos del diagnóstico de falla o avería.

- Determinación de las causas de una falla o avería.
- Determinación de las medidas a adoptar para evitar la repetición de una falla o atenuar sus efectos en caso de que lo primero no sea posible

Requiere de la integración de los siguientes elementos.

- Un sistema de toma de datos y obtención de muestras de fallas.
- Pruebas de materiales fallados a nivel de laboratorio de estudios de materiales.
- Caracterización y clasificación de fallas para su utilización como herramienta fundamental en el trabajo de diagnóstico.
- Procesamiento estadístico de todas las fallas ocurridas.
- Análisis de cada falla con aplicación de los resultados a la implantación casuística de medidas dirigidas a reducir la avería al entorno técnica y económicamente permisible.

1.5 El mantenimiento dentro del proceso productivo.

Debido al perfeccionamiento de las estructuras económicas y al desarrollo científico técnico, cada vez más se requiere de la utilización de técnicas de mantenimiento flexibles y eficientes que eleven de forma drástica la efectividad de la actividad y su incidencia en el proceso productivo, de ahí la necesidad creciente a nivel mundial y nacional de la utilización de técnicas de Mantenimiento Predictivo.

El esclarecimiento de las relaciones entre el sistema de mantenimiento y otras "áreas" del proceso productivo permiten establecer nexos que pueden influir en su comportamiento así como algunos factores que dificultan su funcionamiento. En la Fig 2, se establecen las relaciones necesarias entre el sistema de mantenimiento con las otras áreas del proceso productivo.

De la figura se destacan algunos aspectos de interés que facilitan una mejor comprensión.

- El diseño del proceso productivo debe armonizar con el sistema de mantenimiento.
- El sistema de mantenimiento no planifica sin considerar los requerimientos de la producción.
- El control de stock debe garantizar que no se programen operaciones de mantenimiento sin el debido aseguramiento.

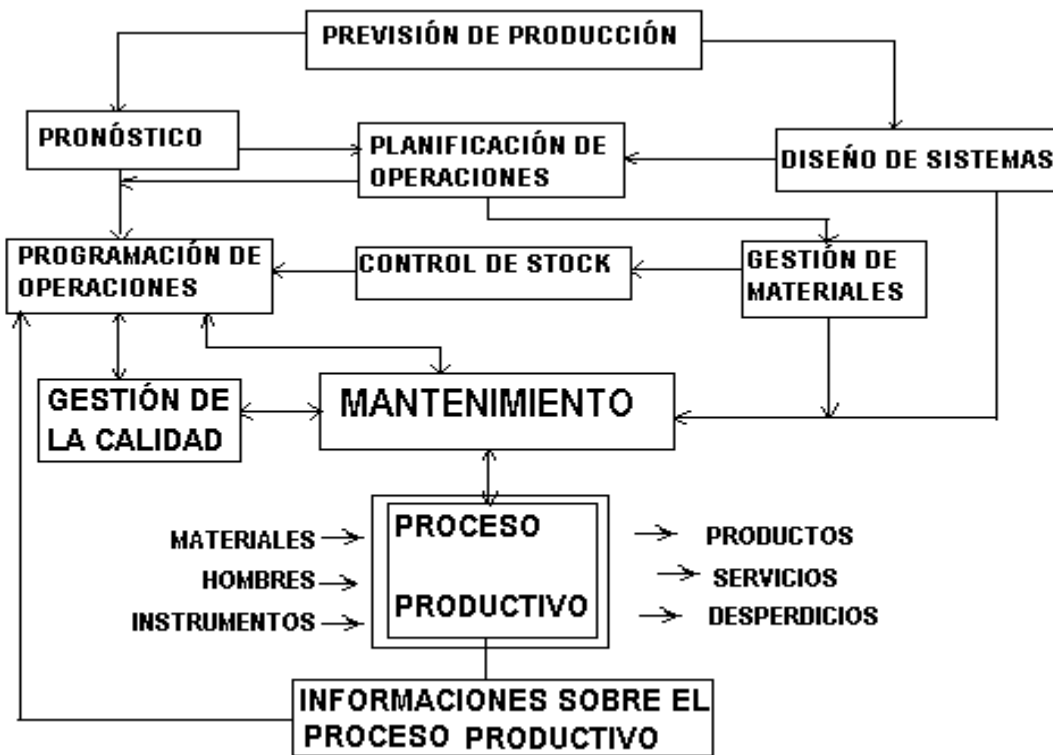


Fig.2. Posición y relaciones del mantenimiento dentro del esquema de un proceso productivo. (*Mourdoch, 1997*).

1.6 Característica actual de la entidad

La Central Termoeléctrica “Carlos M. de Céspedes” perteneciente a la Unión Eléctrica (UNE) del Ministerio de la Industria Básica (MINBAS) está ubicada en la carretera O’Bourke # 914 en el Municipio Cienfuegos de la provincia del mismo nombre. La misma presenta una estructura organizativa que garantiza un orden de jerarquía, compuesta por 486 trabajadores subdivididos por Unidades Empresariales Básicas que dan respuestas a la nueva estructura asociada con el Perfeccionamiento Empresarial.

Su capacidad de generación actual es de 316MW, La empresa Termoeléctrica “Carlos Manuel de Céspedes” está compuesta por dos unidades de fabricación Japonesa (unidades III y IV) que generan 158 MW cada una de la firma japonesa HITACHI

El área técnica es la que lleva el peso fundamental de la producción de energía eléctrica. Dicha área está constituida por varios departamentos funcionales, cuyas actividades se aglutinan alrededor de dos actividades fundamentales La explotación del equipamiento, el mantenimiento y conservación del mismo.

El cumplimiento de los indicadores constituye, a partir de un sistema netamente planificado, uno de los objetivos principales en los controles de la rentabilidad, ganancia y eficiencia de la empresa, ya que están plenamente relacionados con los gastos de materia prima, el empleo óptimo de la maquinaria para una producción con calidad, con los menores gastos de materiales durante el cumplimiento de los planes productivos a corto y largo plazo.

Dentro de estos indicadores se pueden seleccionar:

- ❖ La generación bruta,
- ❖ El insumo
- ❖ Factor de insumo.
- ❖ Factor de capacidad disponible.
- ❖ Consumo de combustible,.

Estos indicadores hacen posible que el proceso de generación sea orientado y controlado. Por su estabilidad histórica reflejada en el comportamiento de sus indicadores, la Central Termoeléctrica “Carlos Manuel de Céspedes” califica como una de la más eficiente del país.

1.7 Situación actual y perspectivas de desarrollo

En la actualidad la empresa muestra resultados que evidencian una real recuperación técnica-económica. La empresa se propuso a partir del año 2013, entre otros, los siguientes objetivos:

- ❖ Elevar la eficiencia en la producción de energía, con la disminución del índice de Consumo Específico de Combustible en 1.5 g/Kw y el Factor de Insumo en 0.1 % con respecto a los planes a lo largo de estos años.
- ❖ Elevar el Factor de Capacidad Disponible en un 2 % con respecto al plan.
- ❖ Garantizar el cumplimiento al 100% del programa de mantenimiento, empleando el control de la calidad.
- ❖ Mantener y mejorar la aplicación del Sistema de Mantenimiento por Diagnóstico aplicado.
- ❖ Implantar el Sistema de Aseguramiento de la Calidad a largo plazo, según lo establecen las normas internacionales ISO 9000.

- ❖ Implantar el Sistema de Gestión Ambiental que minimice el impacto en la empresa y áreas aledañas.
- ❖ Perfeccionar el Sistema de Gestión de los Recursos Humanos.
- ❖ Perfeccionar el Sistema de Gestión de Mantenimiento.
- ❖ Garantizar el uso de combustible nacional en el proceso de generación, en nuestra central, a partir de un fuerte proceso de inversión.

1.8 Principales Producciones y Significación Social

La única producción de la ETE Cienfuegos, es la entrega de energía eléctrica a la red nacional (SEN). Esta Energía producida se obtiene a un costo bajo y con altos índices de eficiencia que colocan a la Empresa entre las mejores Centrales del país.

La importancia social de la empresa es grande, aparte de garantizar la energía eléctrica a la población y la Industria baluarte indispensable para el desarrollo, la empresa también es un centro de formación de nuevos técnicos y profesionales, labora como laboratorios de la Universidad de Cienfuegos para las prácticas de varias materias y especialidades, ayudando con ello a elevar el desarrollo práctico de futuros ingenieros, el centro es también promotor de muchos trabajos de diploma, maestrías e incluso doctorado.

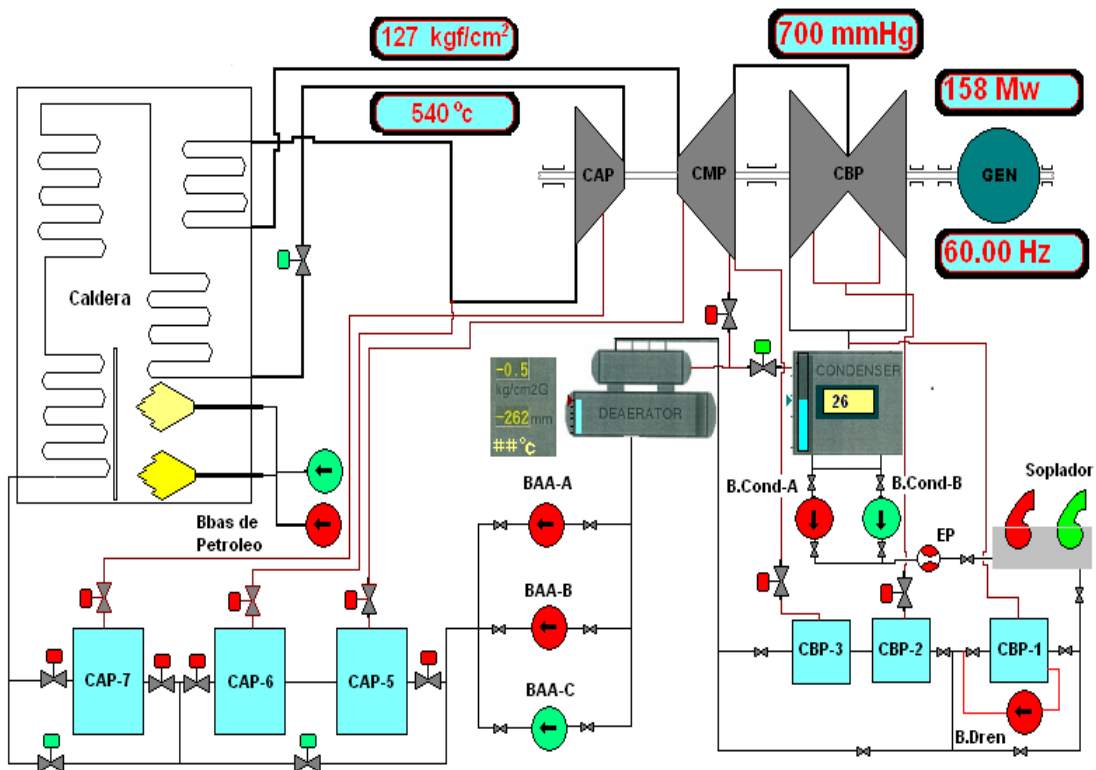
1.9 Características del objeto de estudio. Principio de funcionamiento de la Central Termoeléctrica.

En la figura 3. Se sintetizan los principios de funcionamiento de la central, la misma está compuesta por varios sistemas.

- Sistema de Petróleo
- Sistema de caldera
- Sistema de agua desmineralizada.
- Sistema de circulación.
- Sistema de condensado.

- Sistema de agua de alimentar.
- Sistema de drenajes de la turbina

Figura 3. Funcionamiento del sistema para la generación eléctrica



Conclusiones Capitulo 1

En el presente capítulo se propuso Realizar una valoración técnica de la organización del mantenimiento en la Central Termoeléctrica CMC de Cienfuegos para ello fue necesario:

- Desarrollar un estudio de la situación actual del mantenimiento en la industria, donde se tuvo en cuenta, las prácticas Nacionales e Internacionales relacionadas con la formas de organización. Y la posición o relaciones del mantenimiento con el proceso productivo.
- Realizar análisis de la situación actual de la gestión del mantenimiento dentro de la empresa,

CAPITULO II. CONCEPTOS Y TERMINOLOGÍAS RELACIONADA CON EL PARÁMETRO SÍNTOMA VIBRACIONES MECÁNICAS.

En este epígrafe se sintetizan los conceptos generales relacionados con las vibraciones objeto central de estudio del trabajo que se presenta, de ella se indican las propiedades fundamentales que le acontecen, magnitud, frecuencia, fase, puntos de mediciones, normas de severidad de la vibración entre otras.

2.1 Concepto básico de vibraciones

Se entiende por Vibración, movimiento de un cuerpo o sistema por la acción de fuerzas o influencia externas, caracterizada por pequeñas desviaciones o desplazamiento con respecto a una posición de referencia en el espacio, determinada por su estado de equilibrio estático, que se suceden en forma continua. Su desarrollo en tiempo y espacio depende de las propiedades físicas del cuerpo o sistema, de las características de la acción excitadora y de otras eventuales influencia externas.

En la práctica técnica se estudia como la proyección del movimiento en un eje de referencia dado por la dirección de medición y con el uso de equipos e instrumentos especiales.

Definición según Norma ISO 2041-1974, es toda variación en el tiempo, de una magnitud que describe el movimiento o la posición de un sistema mecánico, cuando esta magnitud es alternativamente mayor o menor que cierto valor promedio o de referencia

Un caso notable para su estudio resulta cuando la ley del movimiento vibratorio responde a una función sinusoidal o casinusoidal del tiempo, o sea, las llamadas funciones armónicas, en el caso clásico del movimiento armónico simple y responden a la ecuación, $s = A \sin(\omega t + \Phi)$

2.2 Terminologías asociadas a las vibraciones

Se Entiende por Dirección de la medición, la dirección definida por la posición instantánea, del eje de sensibilidad del transductor del equipo de medición según el diseño del fabricante, en el momento de efectuar la medición.

Por **vibración vertical**, se entiende la componente de la vibración obtenida, mediante la medición realizada en la dirección vertical; es un caso particular de las mediciones transversales para equipos rotatorios con eje de giro horizontal. Se simboliza con la letra V.

2.2.1 Por vibración Horizontal, se entiende la componente de la vibración obtenida, mediante la medición realizada en la dirección horizontal, y perpendicular al eje de giro del equipo, para los casos de que el mismo sea horizontal, en estos casos es igualmente un caso particular de medición trasversal Se simboliza con la letra H

2.2.2 La vibración radial, sustituye en los términos de vibraciones verticales y horizontales en las mediciones efectuadas en equipos con eje de rotación vertical, son perpendiculares al eje de rotación al igual que las vibraciones transversales. Se simboliza con la letra R.

2.2.3 La vibración axial, es la componente de la vibración obtenida mediante la medición realizada, paralela con el eje de rotación del equipo, en los equipos con ejes de rotación horizontal coincide con el caso particular de mediciones horizontales, y en los casos de eje de rotación vertical con un caso particular de mediciones verticales. No obstante, por definición se identifica como axial y se simboliza con la letra A

2.2.4 El plano de la medición, no es mas que el lugar geométrico del equipo, determinado por un plano imaginario transversal, es decir , perpendicular al rotor, y en el cual yacen las direcciones y los puntos de aplicación para las mediciones transversales (V, H, A) de las vibraciones. Los planos de mediciones se eligen y determinan en los lugares del equipo que, teniendo acceso para las mediciones, son los que muestran las vibraciones más representativas de las zonas o partes del equipo estudiadas.

2.2.4 Amplitud, es el valor máximo que alcanza cualquiera de las magnitudes que definen el movimiento vibratorio (desplazamiento, velocidad aceleración), durante un ciclo, ya sea en sentido positivo o negativo a partir del valor cero en la onda que representa su variación en función del tiempo.

2.2.5 Frecuencia, según *Norma ISO 2041-1974*, es la medida de la cantidad de ciclos completos que acontecen en un intervalo de tiempo específico

2.2.6 Desplazamiento, según *Norma ISO 2041-1974*, es una cantidad vectorial que describe el cambio de posición de un cuerpo o partícula con respecto a un sistema de referencia. Es decir se trata de la medida instantánea de la distancia entre el punto de medición y su posición de referencia. Su unidad de medida es el $\mu m = 0.001 mm$.

2.2.7 Velocidad, según *Norma ISO 2041-1974* es un vector que especifica la derivada del desplazamiento en el tiempo. Es la función que describe el desplazamiento como variable del tiempo. si el desplazamiento es una función (seno, coseno), la velocidad también lo será, pero con un desfase de $T/4$ Su unidad de medida es en mm/s.

2.2.8 Velocidad Efectiva, es el valor medio cuadrático (Valor Efectivo o **R.M.S**) de la velocidad de la vibración durante un ciclo. Es una magnitud de gran valor criterial , ya que caracteriza la energía de la vibración y sus efectos de fatiga sobre los materiales. Por estas razones se utiliza cada vez más y es la magnitud elegida por las recomendaciones de las Normas Internacionales ISO 2372 para valorar el estado de las vibraciones de los dispositivos en base a su " **Intensidad** " y como es mas frecuente en la literatura Inglesa su " **Severidad** " se simboliza con (V_{ef}) y se mide en mm/seg, aunque existen instrumentos calibrados en cm/s y en pulgadas/s.

2.2.9 Aceleración; según *Norma ISO 2041-1974*, es un vector que especifica la derivada de la velocidad en el tiempo, es decir, la segunda derivada del desplazamiento , su importancia radica en que caracteriza los esfuerzos que se producen durante el proceso de vibración y permite, además obtener mayor información cuando se encuentran presentes componentes de alta frecuencia, choques, impactos, aunque los mismos sean de pequeños desplazamientos. Su unidad de medida es mm/seg^2

2.2.10 Fase, Define la posición de un elemento en un momento dado con referencia a un punto fijo a otro elemento. Se acostumbra a medir con grados sexagesimales a menos que se especifique otra cosa Se utiliza para establecer la situación angular de los vectores que representan las vibraciones entre si y sus variaciones entre si. Se simboliza con la letra Φ .

2.2.11 Frecuencia, es la medida de la cantidad de ciclos completos que acontecen en un intervalo de tiempo específico su unidad de medida es el (Hz o RPM).ofrece información sobre los posibles defectos.

2.2.12 Vibraciones de Frecuencia Rotacional (1N), son las vibraciones cuya frecuencia corresponde, en ciclos por segundos, a la velocidad de rotación instantánea del equipo.

2.2.13 Vibraciones de baja frecuencia, son las vibraciones cuya frecuencia es menor que la frecuencia nominal o de operación.

2.2.14 Vibraciones de alta frecuencia, son las vibraciones cuya frecuencia es mayor que la frecuencia nominal o de operación.

2.3 Aplicación en la industria del parámetro vibraciones

Atendiendo a los principios de que.

- ❖ Ninguna estructura es absolutamente rígida por lo que toda fuerza actuante dará lugar a pequeños desplazamientos.
- ❖ La vibración es la reacción de un sistema a una excitación o una fuerza externa o interna aplicada al mismo
- ❖ La vibración indeseada de una maquina suele tener su origen en los problemas mecánicos que pueda presentar la misma.

Los procesos industriales tienen numerosas y diversas fuentes de vibraciones, que aparecen con mas frecuencia en maquinas rotatorias. Siendo la causa fundamental las imperfecciones en la realización de los equipos, las cuales introducen interrupciones o defectos de la simetría de los campos de fuerza los cuales pueden tener un carácter.

- ❖ Inercial,
- ❖ Magnético
- ❖ Eléctrico.
- ❖ Térmico
- ❖ Aerodinámico.

Estas irregularidades de fuerzas aparecen durante la rotación y se trasmiten a través de los cojinetes, partes estacionarias y el fundamento, Con carácter alternativo o a veces en forma de pulso y pueden además ser periódicas o erráticas.

En general, las vibraciones en una máquina no son recomendadas; pueden causar desgaste, fisuras por fatiga, pérdida de efectividad de sellos, rotura de aislantes, ruido, etc. Pero al mismo tiempo las vibraciones son el mejor indicador de la condición mecánica de una maquinaria y pueden ser una herramienta de predicción muy sensible de la evolución

de un defecto. Las fallas catastróficas en una maquinaria muchas veces son precedidas, a veces con meses de anticipación, por un cambio en las condiciones de vibración.

Las vibraciones en una maquinaria están directamente relacionadas con su vida útil de dos maneras: por un lado un bajo nivel de vibraciones es un indicador de que la máquina funcionará correctamente durante un largo período de tiempo, mientras que un aumento en el nivel de vibraciones, nos indica que la máquina se encamina hacia algún tipo de falla. Una de las herramientas fundamentales con que se cuenta en la actualidad para el mantenimiento predictivo de una planta o instalación, es la medición y análisis de vibraciones, ya que cerca del 90% de las fallas en maquinarias están precedidas por un cambio en las vibraciones. No todos los tipos de vibraciones son evitables, ya que algunas son inherentes a la operación de la maquinaria en sí misma, por lo que, una de las tareas del especialista es identificar aquellas que deben ser corregidas, como es el caso del desbalance de los equipos y determinar su nivel de vibraciones tolerable.

El movimiento físico de una máquina rotatoria se interpreta como una vibración cuyas frecuencias y amplitudes tienen que ser cuantificadas a través de un dispositivo que convierta éstas en un producto que pueda ser medido y analizado posteriormente. Así, la frecuencia describirá cual es el problema de la máquina, la amplitud cuán severo es. Y la fase la diferentes causas.

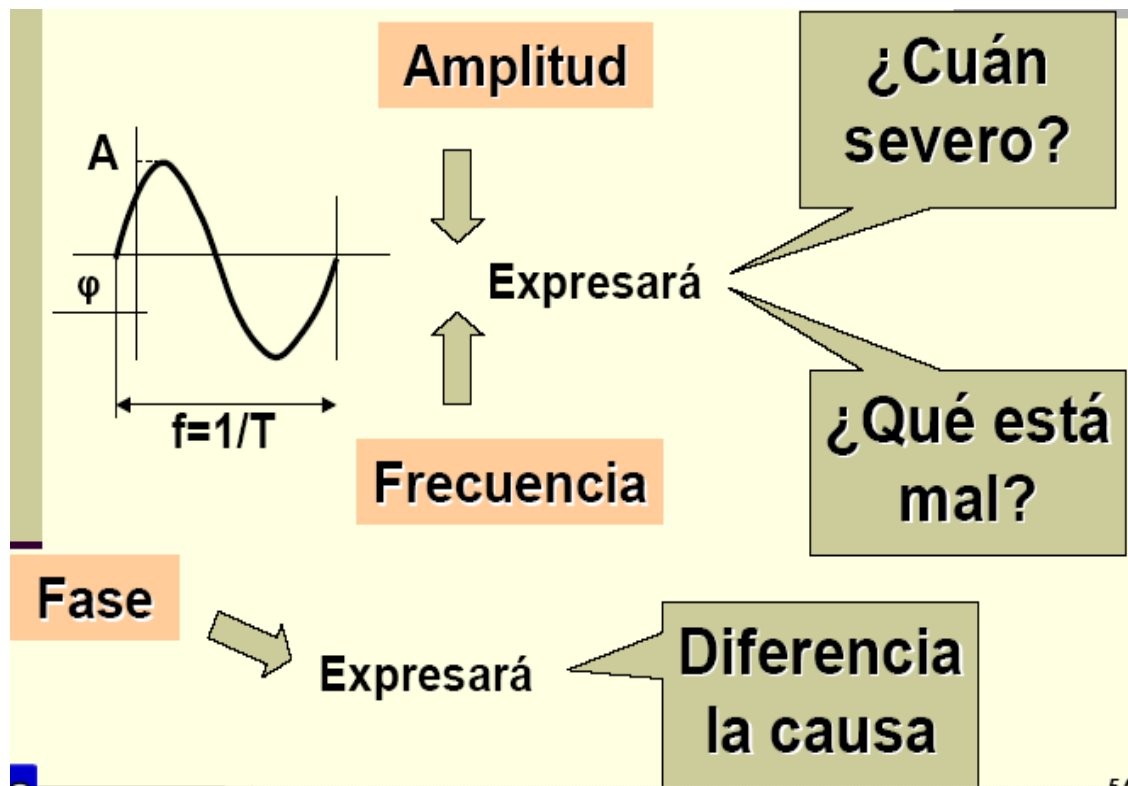


Fig 2.1 Propiedades del movimiento vibratorio

2.4 Aspectos prácticos en la medición de Vibración

2.4.1 Ubicación de los Puntos de Prueba

En general es deseable colocar el transductor de prueba lo más cerca posible del rodamiento, con metal sólido entre el rodamiento y el sensor. Se debe evitar la colocación en las gorras de rodamientos, ya que son hechas de metal delgado y conducen muy poco la energía de vibración. Si es posible habrá que seleccionar los lugares de ubicación de tal manera que no haya juntas entre metal y metal, entre el rodamiento y el sensor. La junta entre la campana y el cárter del estator de un motor es un ejemplo de esto. Cárters de ventiladores y las extremidades de motores se deben evitar.

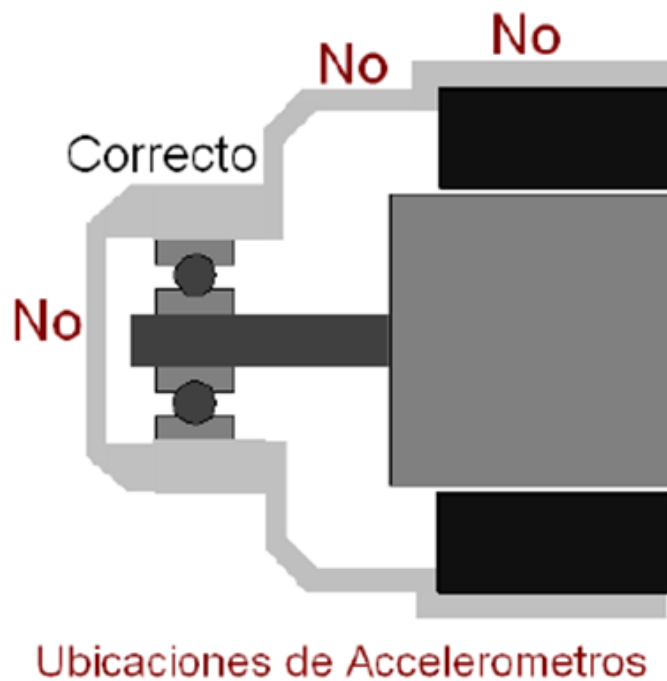


Fig 2.2 Ubicación de los puntos de prueba

En general se ha encontrado que para motores de menos de alrededor de 50 HP un punto de prueba es adecuado, pero para motores de más de 50 HP cada rodamiento debería de tener su propio punto de prueba. En las máquinas sensibles a los daños en los rodamientos y en las que los problemas de rodamientos se deberían detectar lo más temprano posible, cada rodamiento debería tener su propio punto de prueba

2.5 Vibraciones absolutas y relativas en eje. Componentes de la dirección de las mediciones.

En un cuerpo que se encuentra en estado vibratorio cada uno de sus puntos realiza, en el caso más general, un movimiento tridimensional con respecto a un sistema espacial de coordenadas convenientemente elegido. Este movimiento se desarrolla en el entorno de una posición de referencia que ocupa un punto en cuestión (con respecto a un sistema de coordenadas) cuando el cuerpo vibra. Para facilitar el estudio de este movimiento se analizan sus proyecciones en los tres ejes de coordenadas y se hace coincidir el origen con un punto conveniente en la geometría del cuerpo en estudio.

2.5.1 Vibraciones absolutas.

En los casos que con mayor frecuencia se realiza, es el estudio de la vibraciones en máquinas rotatorias, gran parte de la tarea se realiza analizando el movimiento en los puntos de apoyo de los rotores. Es decir en sus cajas de alojamiento o pedestales de los

cojinetes. Para ello se asume el sistema de coordenadas coincidiendo con el centro geométrico del cojinete. Y el eje de rotación del equipo.

De esta manera queda definida las vibraciones verticales, horizontales y axiales

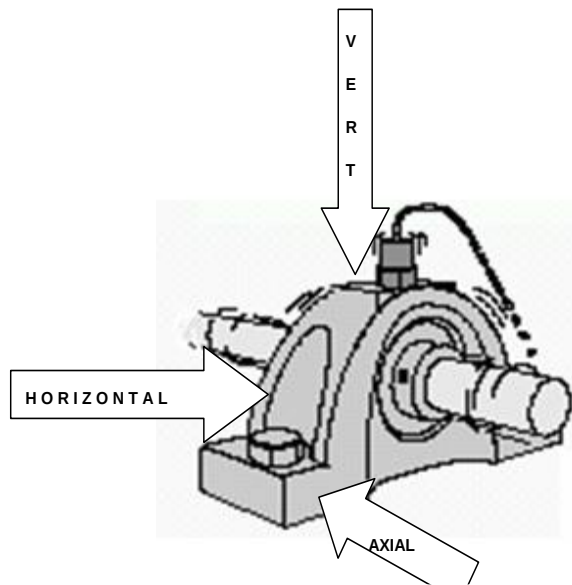


Fig 2.3 Dirección de las mediciones absolutas

2.5.2 Vibraciones relativas en eje.

La medición de vibraciones relativas en eje se miden con sensores de desplazamiento, su forma fundamental está compuesta por 2 sensores de desplazamiento a 45° con respecto a un punto de referencia en la posición vertical del pedestal, quedando insertados por orificios que se comuniquen con observaciones del movimiento del eje. En la figura 2.4 a continuación se representa un esquema de la medición

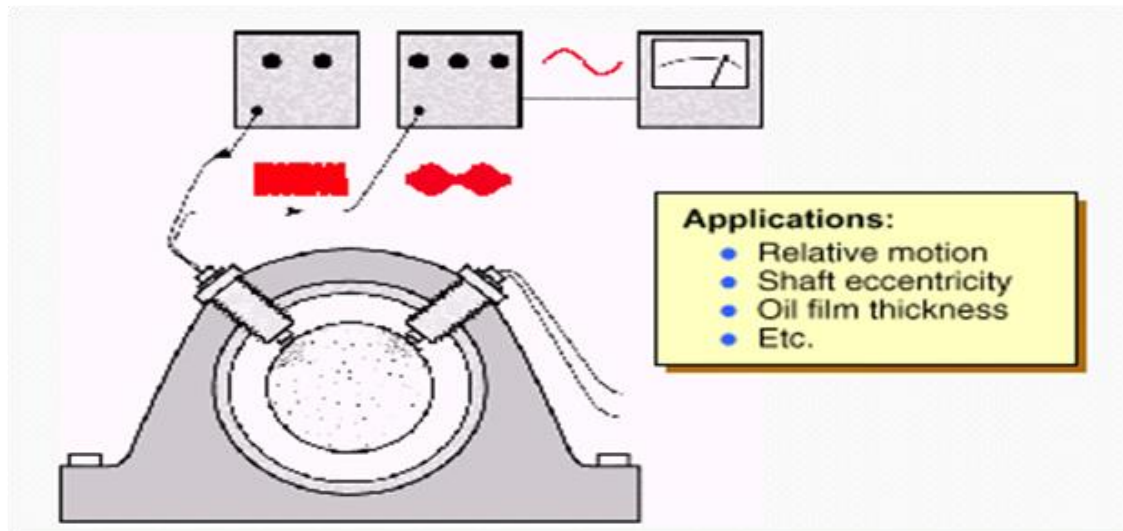


Fig 2.4 Dirección de las mediciones relativas

2.6 Instrumentos y técnicas para medición y análisis de vibraciones

2.6.1 Requisitos de la medición y análisis de vibraciones.

La vigilancia y control de vibraciones en los equipos industriales rotatorios tiene como fin utilizarlas como fuentes de criterios para evaluar el estado técnico junto a otros parámetros característicos para cada caso como.

Presión, Temperatura, Eficiencia, Capacidad de trabajo., Respuesta a los mandos

Así como síntomas para establecer las causas de eventuales anomalías en su funcionamiento. Todo esto ha traído apareado un auge en la difusión asimilación y aplicación en el nivel industrial de diversas técnicas de análisis vibracional, que hasta entonces se mantenían a nivel de laboratorios.

2.6.2 Herramientas para medición y análisis de las vibraciones.

Transductores: Convierten el movimiento vibratorio mecánico en una señal eléctrica que copia fielmente sus características.

Vibro analizadores: Procesamiento de la señal eléctrica de los transductores para acondicionarla en forma de datos numéricos y características graficas.

Programas de computo: Elaboran la información obtenida con fines evaluativos y de diagnostico mediante normativas o patrones de estado, con la ayuda de algoritmos apropiados.

2.6.3 Tipos de Transductores de vibración.

Se clasifican atendiendo a diversos puntos de vista, aunque estas clasificaciones se solapan entre sí, en la forma siguiente.

2.6.3.1 Por inducción electromagnética. Transductores de velocidad

Tienen fija una bobina en el entrehierro de un imán permanente mediante una suspensión elástica fijándose este conjunto a la cargaza (cuerpo del Transductor, cuando vibra la cargaza desde el exterior, la bobina vibrara también en su interior con una vibración igual en frecuencia y forma de onda a la exterior y proporcional en magnitud, siguiendo las leyes de las vibraciones forzadas y a las propiedades dinámicas de un sistema oscilatorio (masa de la bobina, rigidez de la suspensión elástica y amortiguamiento. Apareciendo para estas condiciones en los terminales de la bobina una fuerza electromotriz (señal de voltaje) proporcional a la vibración instantánea de la bobina.

2.6.3.1 Por efecto piezoeléctrico. Transductores de aceleración

Se basan en las propiedades de ciertos materiales de producir carga eléctrica en su superficie cuando son sometidos a esfuerzos mecánicos. En el transductor se encuentra un anillo de material piezoeléctrico con una de sus caras en contacto con la base y con una masa m ., este sistema se mantiene unido con un vástago central con una tuerca y un resorte arandela.

2.6.3.3 Por corrientes parasitas Transductores de desplazamiento

Se basan en el cambio de amplitud de una señal portadora (voltaje), que se produce en una bobina plana situada en el extremo de una sonda cuando varía la distancia de esta a una superficie electroconductiva a causa de las corrientes parásitas que se generan, se conocen también como corrientes de Foucault o **“eddycurrent” en literatura inglesa.**

En resumen, el transductor de corriente parásitas tiene una señal de salida en forma de voltaje proporcional al desplazamiento del objeto que vibra cuando este está en reposo y por la componente oscilante que es proporcional al desplazamiento de la vibración generada.

2.6.3.4 Transductores de desplazamiento: llamados también de proximidad, como los de corriente parasitas y otros tipos como los de transformadores diferencial, donde: $u = k \cdot s$.

Unidades de medidas de las vibraciones.

Amplitud del desplazamiento.

$\mu m = 0.001 \text{ mm} = 10^{-6} \text{ m}$. (micrones el mas usado).

Amplitud de la velocidad-

Mm/s, cm/s, y en pulgadas /s

Amplitud de la aceleración:

mm/s^2 o en múltiplos de g (aceleración gravitacional). En las figuras a continuación se presentan algunos instrumentos actuales de mediciones de vibraciones.



Fig. 2.5 Instrumentos de mediciones de vibraciones

Funciones.

- 1.- Para realizar rutas pre configuradas de medición de vibraciones.
- 2.- Para medir vibración en valor global de vibración.
- 3.- Para visualizar espectros de vibración y, señales en el tiempo, pulsos de choque (estado de rodamientos y engranes)
- 4.- Para medidas de otros parámetros DC y AC, RPM, Angulo de fase, temperatura.
- 5.- Para realización de balances in situ
- 6.- Para medición de orbitas de eje y chumacera.
- 7.- Para realizar características de velocidad. (Velocidad vs vibraciones)

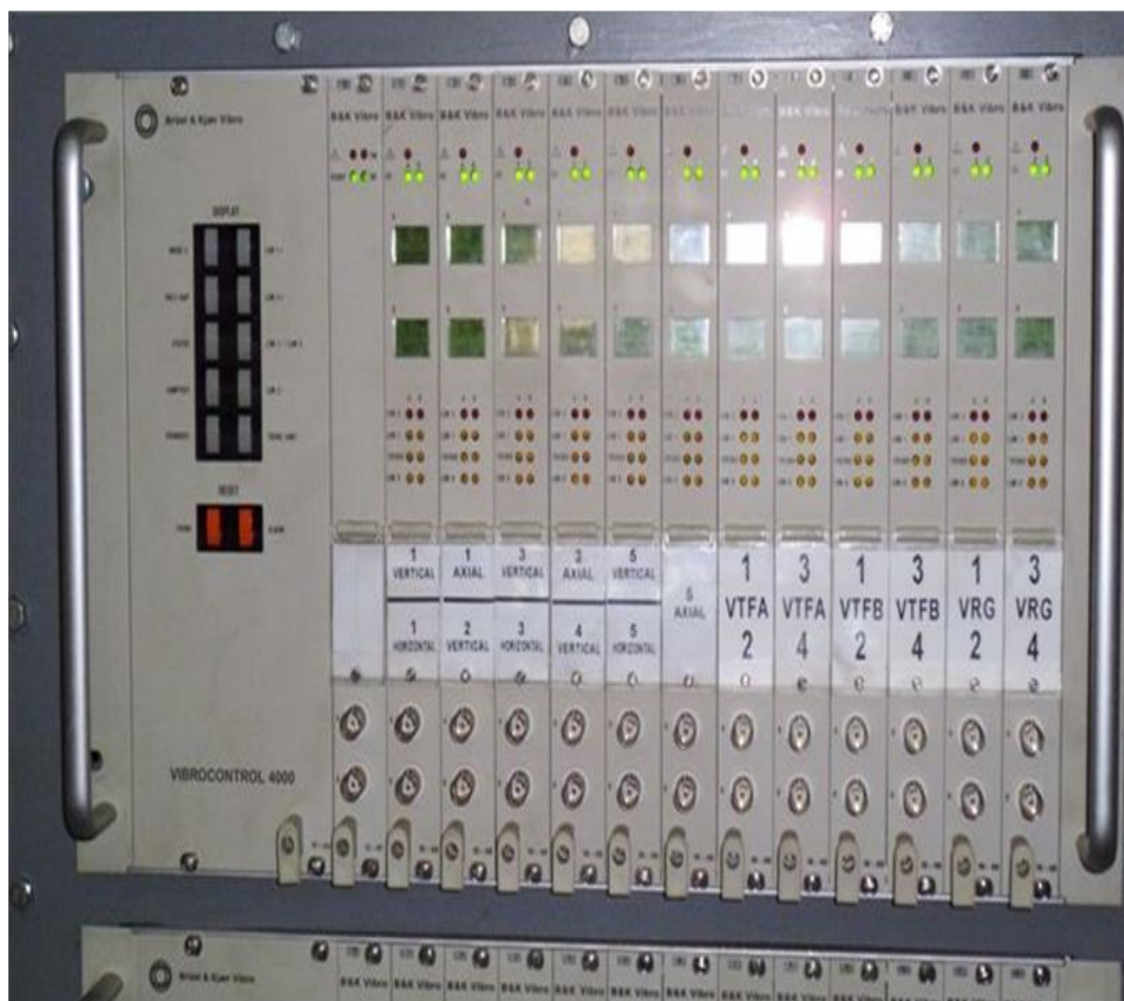


Fig 2. 6 Instrumento de mediciones de vibraciones (Vibro control 4000)

Funciones.

- 1.- Mediciones dinámicas en tiempo real
- 2.- Para medir vibración en valor global, mediciones Absolutas y Relativas en eje.
- 3.- Para visualizar espectros de vibración
- 4.- Mediciones de RPM.
- 5.- Expansiones relativa y absoluta de turbina

2.7- Normas de vibraciones ISO 10816/96 vibraciones absolutas y relativas.

2.7.1 Evaluación de la severidad de las vibraciones,

A través de la medición de éstas sobre elementos no rotatorios. Chumaceras, pedestales, bases, se puede llegar a conocer el estado con que funciona un equipo, antes y después del mantenimiento y en los complejos procesos de explotación, para ello el empleo de normas como la que relacionamos a continuación, nos permiten si no tenemos criterios del fabricante u valoraciones con datos históricos conocer la severidad de los defectos relacionados con las vibraciones en un sistema.

En la normas ISO se pueden encontrar las partes que relacionamos a continuación con el tipo de maquinaria y el potencial que operan.

Estándar ISO 10816.

Parte 1. Partes individuales de motores y máquinas en general, vinculadas integralmente en condiciones normales de operación. Los motores eléctricos de hasta 15 kW de potencia constituyen ejemplos de ésta categoría.

Parte 2: Grandes turbinas de vapor con capacidad superior a 50 MW.

Parte 3: Máquinas industriales con potencias superiores a 15 kW y velocidades nominales entre 120 r.p.m. y 15000 r.p.m.

Parte 4: Turbinas de gas, incluyendo turbinas de aviación.

Parte 5 Máquinas vinculadas a plantas hidroeléctricas y de bombeo.

Parte 6: Máquinas reciprocantes con potencias superiores a los 100 kW.

Estándar ISO 10816. <i>Parte 3</i>				
45.00	No Permissible	No Permissible	No Permissible	No Permissible
28.00			Límite	Admisible
18.00				
11.20		Límite	Admisible	
7.10				
4.50	Límite	Admisible	Normal	
2.80	Admisible			
1.80	Admisible	Normal		
1.12				
0.71	Normal			Normal
0.45				
0.28				
↑ Vel. [mm/s] RMS	Clase I	Clase II	Clase III	Clase IV

Fig 2.7. Norma ISO 10816 Severidad s de las vibraciones mm/s RMS

Norma ISO 10816- 3, aplicable es la actualidad a los equipos industriales de planta. Esta contiene toda la gama de equipos existentes en planta, y nos permite relacionar con gran efectividad el estado de la técnica.

Clase I Partes individuales de motores y máquinas en general, vinculadas integralmente en condiciones normales de operación. Los motores eléctricos de hasta 15 kW de potencia constituyen ejemplos de ésta categoría.

ISO 10816. Clase II

Máquinas de medianas dimensiones (típicamente motores eléctricos de entre 15 kW y 75 kW de potencia) montadas sobre bases convencionales. Máquinas de hasta 300 kW montadas en bases especiales

ISO 10816. Clase III

Grandes máquinas motrices y cualquier otro tipo de máquina rotatoria, montadas sobre bases rígidas y pesadas, exhibiendo rigideces relativamente altas en la dirección donde se efectúe la medición de vibraciones.

ISO 10816. Clase IV

Grandes máquinas motrices y cualquier otro tipo de máquina rotatoria, montadas sobre bases relativamente flexibles en la dirección donde se efectúe la medición de vibraciones (por ejemplo, turbogeneradores y turbinas de gas, cuyas potencias sean superiores a 10 MW).

En la figura 4. Se da una breve visión sobre los sistemas rígidos y flexibles que permiten identificar con mayor facilidad la clasificación de los equipos, durante la aplicación de la norma para determinar los estados de los sistemas.

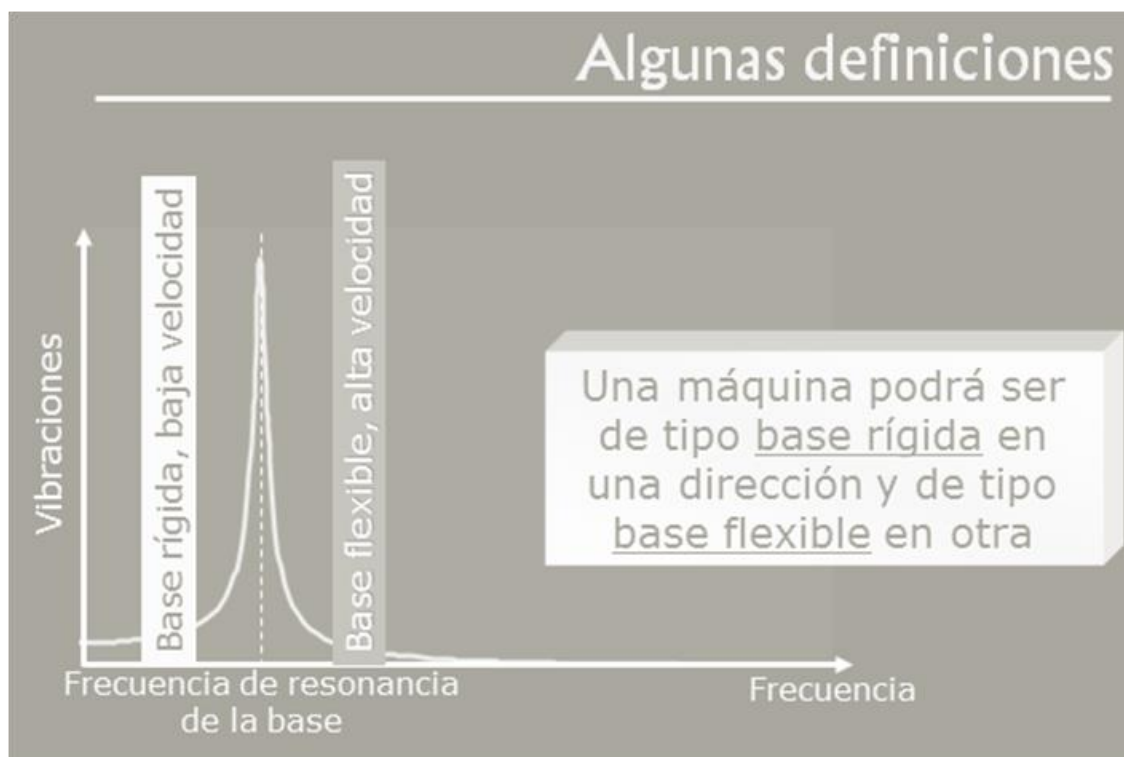


Fig 2.8 Clasificación de sistemas rígidos y flexibles

ZONA DE EVALUACIÓN	VELOCIDAD OPERACIONAL DEL EJE EN RPM			
	1500	1800	3000	3600
	Máximo de la vibración relativa del desplazamiento del eje			
A				
B	100	90	80	75
C	200	185	165	150
D	320	290	260	240

Tabla 2.0 Equipos industriales con su base en tierra .**norma DIN ISO 7919, mediciones de vibraciones relativas en eje.**

La norma **DIN ISO 7919:** permite la valoración de máxima vibración relativa del desplazamiento en la Zonas límite en micrones.

2.7.2 Zonas de evaluación de acuerdo a la norma DIN ISO 7919:

Zona A. Vibración en máquinas recién instaladas

Zona B. Máquinas normalmente consideradas aceptables con funcionamiento no restringido a largo plazo

Zona C Máquinas normalmente consideradas insatisfactorias con funcionamiento continuo a largo plazo

Zona D Valores de vibración que son considerados de suficiente severidad para causar daño a la máquina

2.7.3 Algunos criterios para Medición y Evaluación

Criterio I: Las vibraciones relativas del eje no deben exceder los valores máximos especificados

Criterio II: Los cambios en la vibración del eje, relativas al límite establecido, no deben exceder los límites especificados

2.7.4 VALORES PATRONES Y VALORES BASES DE FRECUENCIA.

Valores patrones: son el resultado de la limitación de los buenos y malos estados de los niveles de vibraciones que permiten establecer, los límites de explotación de mantenimiento y posibles roturas.

Los espectros patrones se toman similares a los niveles totales de las vibraciones

Conclusiones Capítulo 2

En este capítulo se realizó una investigación de los conceptos de vibraciones aplicadas al mantenimiento.

Se realizó un estudio de los sistemas de diagnósticos aplicados en los equipos rotodinámicos para conocer su estado según las normas establecidas por el fabricante

CAPITULO 3. DISEÑO DE METODOLOGÍA PRACTICA PARA LOS CAMBIOS PAULATINOS EN LA APLICACIÓN DE LAS NORMAS SE SEVERIDAD DE LAS VIBRACIONES ISO 10816-3 POR VALORES PATRONES HISTÓRICOS.

A partir de los estudios teóricos de las vibraciones y las condiciones actuales de la empresa dada por un fuerte sistema de diagnóstico en equipos fundamentales de planta, se puede lograr la introducción de una metodología para el control y variaciones de los límites de severidad de las vibraciones, atendiendo a la combinación de las normas ISO y los valores históricos del monitoreo del parámetro vibraciones. Para esto se desarrollarán una serie de paso tomando como ejemplo práctico de aplicación las turbinas, dado la importancia técnico económico que estas presentan como equipos fundamentales en el proceso de generación, a continuación se enumeran, los pasos durante la aplicación de la metodología.

Pasos de aplicación para el diseño de la metodología.

1. Generalidades del equipo o sistema.
2. Bases de datos del parámetro vibraciones.
3. Análisis Causa-Efecto del parámetro vibraciones.
4. Análisis y resultados Espectral y Señal en el Tiempo de las vibraciones.
5. Obtención de los límites de severidad en cada equipo por puntos de mediciones.
6. Resultados técnicos durante su aplicación.
7. Generalización de la aplicación en otros dispositivos.

3.1 GENERALIDADES.

Las turbinas objeto de estudio de las unidades 3 y 4 de la CTE "CMC" son de fabricación japonesa y tienen como función convertir la energía del vapor en energía cinética de rotación del rotor del generador que a su vez convierte la energía cinética en energía eléctrica.

Estas unidades poseen un ciclo de recalentamiento del vapor para devolver a este sus características de trabajo. El vapor procedente del Cilindro de Alta Presión vuelve al generador de vapor a elevar su temperatura disminuyendo la humedad que es un factor importante para la seguridad de la turbina; del generador el vapor regresa para incorporarse a los cilindros de media y baja presión.

3.1.1 Generalidades del equipo objeto de estudio.

DESCRIPCION GENERAL DE LA TURBINA.

Esta turbina es de acción, alineada en la misma dirección con el generador eléctrico, de tres cilindros; alta, media y baja presión. El cilindro de Alta presión es de acero fundido y tiene integralmente acoplada la caja de válvulas de regulación, está diseñado para resistir altas presiones y temperaturas de operación. El cilindro de media presión posee válvulas combinadas de vapor recalentado por donde recibe el vapor procedente del recalentador del generador de vapor. El cilindro de baja presión es de doble flujo con lo cual compensa los empujes axiales que se producen en él.

El pedestal frontal está atornillado al cilindro de alta presión y a través de la chumacera de empuje axial situada en este permite los desplazamientos del rotor en ambas direcciones y la compensación de estos desplazamientos (hasta el 70 %). En el extremo de baja presión está atornillado el conducto de escape, el cual al igual que los cilindros está dividido horizontalmente permitiendo el desarme e inspección.

Todas las partes sometidas a altas temperaturas están recubiertas con aislamiento. La parte de alta temperatura está protegida también por una caseta de acero que permite el trabajo en su interior tanto de los operadores como los operarios de mantenimiento.

ROTOR.:

El rotor está construido de acero aleado forjado, compuesto por dos elementos unidos sólidamente por un acoplamiento; en el primer elemento se encuentran los rotores de alta y media presión y en el otro elemento el rotor de baja presión.

Los alabes están hechos de acero cromado extremadamente resistente a la corrosión y a la erosión por el vapor y están unidos por bandajes de sujeción para evitar las vibraciones de estos durante el trabajo y su destrucción; los discos de baja presión donde se sujetan las paletas de mayores dimensiones poseen cordones de bandaje soldados a los alabes ya que son estas las que mayor amplitud de oscilación poseen, y están protegidas en los bordes con refuerzos de estelita para disminuir el efecto de erosión producido por la humedad que arrastra el vapor a altas velocidades.

En total la turbina consta de 18 etapas; 6 de alta presión, 7 de media presión y 5 de baja presión (son dobles).

Uno de los elementos claves para el control de la confiabilidad operacional de turbinas lo constituye de un lado el mantenimiento preventivo planificado, para ello reviste una vital importancia el control del deterioro de los parámetros de estado, que para el caso de estas turbinas cuenta con un sistema de monitoreo del parámetro óptimo vibraciones entre otros, además con un sistema de monitoreo en tiempo real y otro sistema de monitoreo periódico, que permiten evaluar de manera rápida los cambios de estados relacionados con una posible avería.

3.2 Base de Datos para el control y análisis de los parámetros de muestreo.

Como es sabido, el conocimiento del diseño y condiciones de funcionamiento de los equipos resulta importante para el análisis de los parámetros de estado y de los posibles fallos que se producen en los mismos. De igual forma estos guardan una relación entre sí, que es necesario tener en cuenta en cualquier análisis dinámico de ellos.

En correspondencia con lo anteriormente señalado se infiere la necesidad de la creación de las **Bases de Datos** durante el diseño de una metodología para la introducción y cambios de límites de severidad de las vibraciones, a partir de valores históricos de cualquier tipo de dispositivo. Estas deben agrupar: sus características constructivas, sus condiciones de explotación, los datos necesarios relativos a todas las pruebas y a los

mantenimientos, de forma tal que permitan un análisis dinámico y profundo del estado del mismo.

A partir de los requerimientos anteriores, en el Anexo 1 se muestran los valores reales de la Base de Datos de las turbinas de las Unidades Japonesas. De igual forma, a continuación se muestra, en síntesis la generalización de los mismos.

3.2.1 Datos del monitoreo periódica de las vibraciones.

El resultado de las tablas Anexo1 se obtiene de un estudio realizado para el control del parámetro vibraciones, según se muestra a continuación

Tipo de mediciones.

Nivel total de vibraciones en valores absolutos. Velocidad de la vibración en mm/s (RMS).

Nivel total Vibraciones en eje, relativas en micrones.

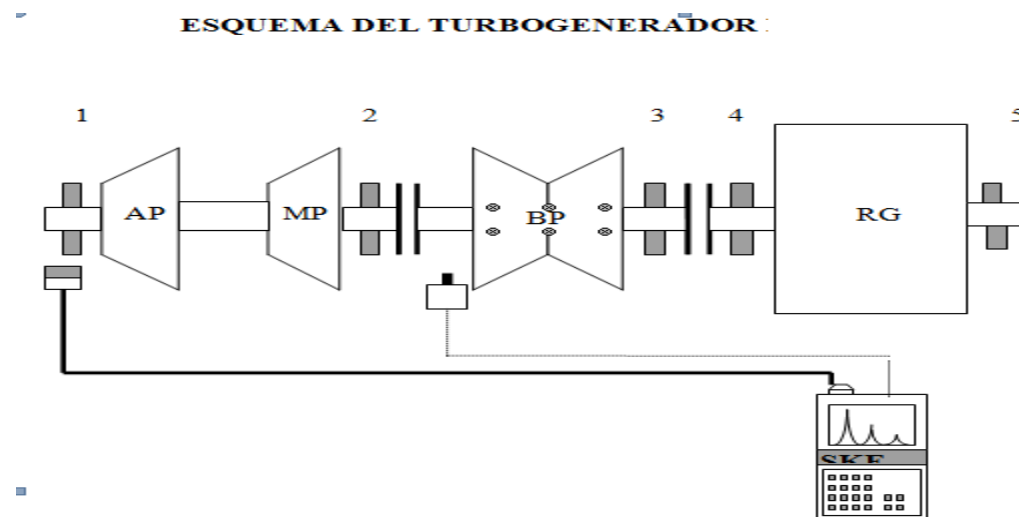


Fig 3.0 Representación de los puntos de medición de turbina

Donde; los puntos 1 al 5 son los apoyos del rotor de la turbina, que a su vez son los representativos de las mediciones de vibraciones absolutas y relativas.

3.2.2 Datos de mediciones y análisis de tendencia para la valoración práctica de la metodología tomando como ejemplo la turbina 3.

De las tablas anexo 1. Durante el año 2014, se grafican a continuación los análisis de tendencia, que nos ejemplifican el comportamiento en el tiempo del parámetro síntoma vibraciones en diferentes puntos de mediciones

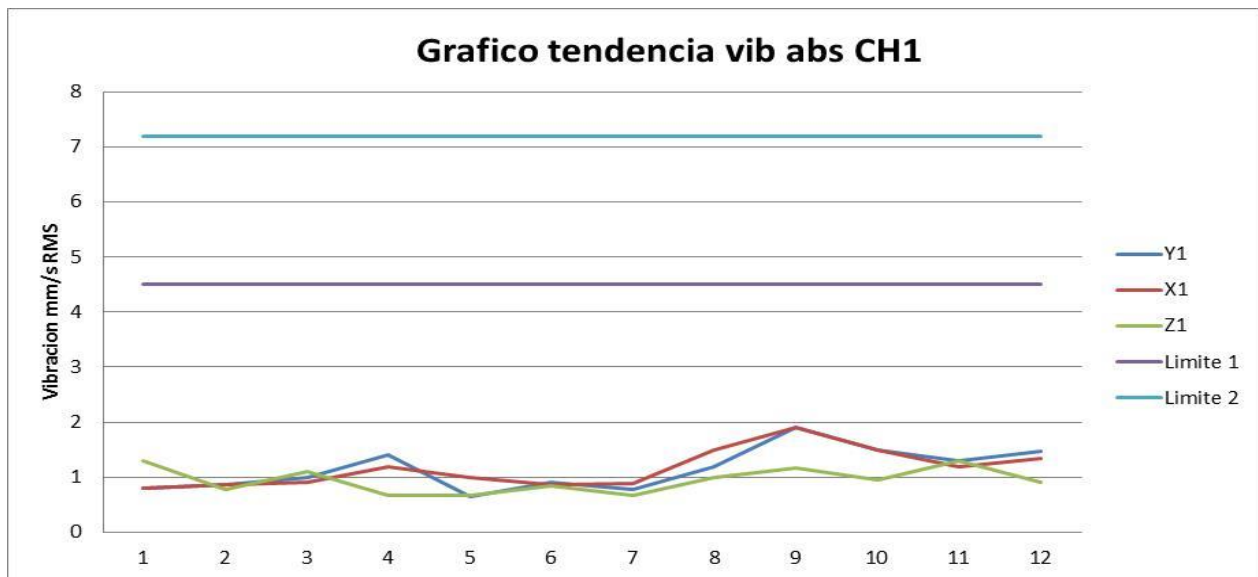


Grafico 3.0 tendencia del comportamiento de las vibraciones absolutas en CH1

Dónde: los valores de vibraciones en las 3 direcciones presentan un estado satisfactorio.

Y los límites de severidad de la vibración (lim1 y lim 2), se logran establecer a partir de patrones preestablecidos por Normas y recomendaciones del fabricante.



Grafico 3.1 tendencia del comportamiento de las vibraciones relativa en CH1

Dónde: los valores de vibraciones en las 2 direcciones presentan un estado satisfactorio.

Y los límites de severidad de la vibración (lim1 y lim 2), se logran establecer a partir de patrones preestablecidos por Normas y recomendaciones del fabricante.

Análisis de tendencia del punto (CH3).

Se cita como ejemplo para establecer la metodología la tendencia del comportamiento en el tiempo para condiciones similares de funcionamiento la ch3, donde aparentemente existen defectos que varían las condiciones de trabajo del turbo grupo, que a su vez nos permite ejemplificar la necesidad de establecer los posibles cambios de los límites.

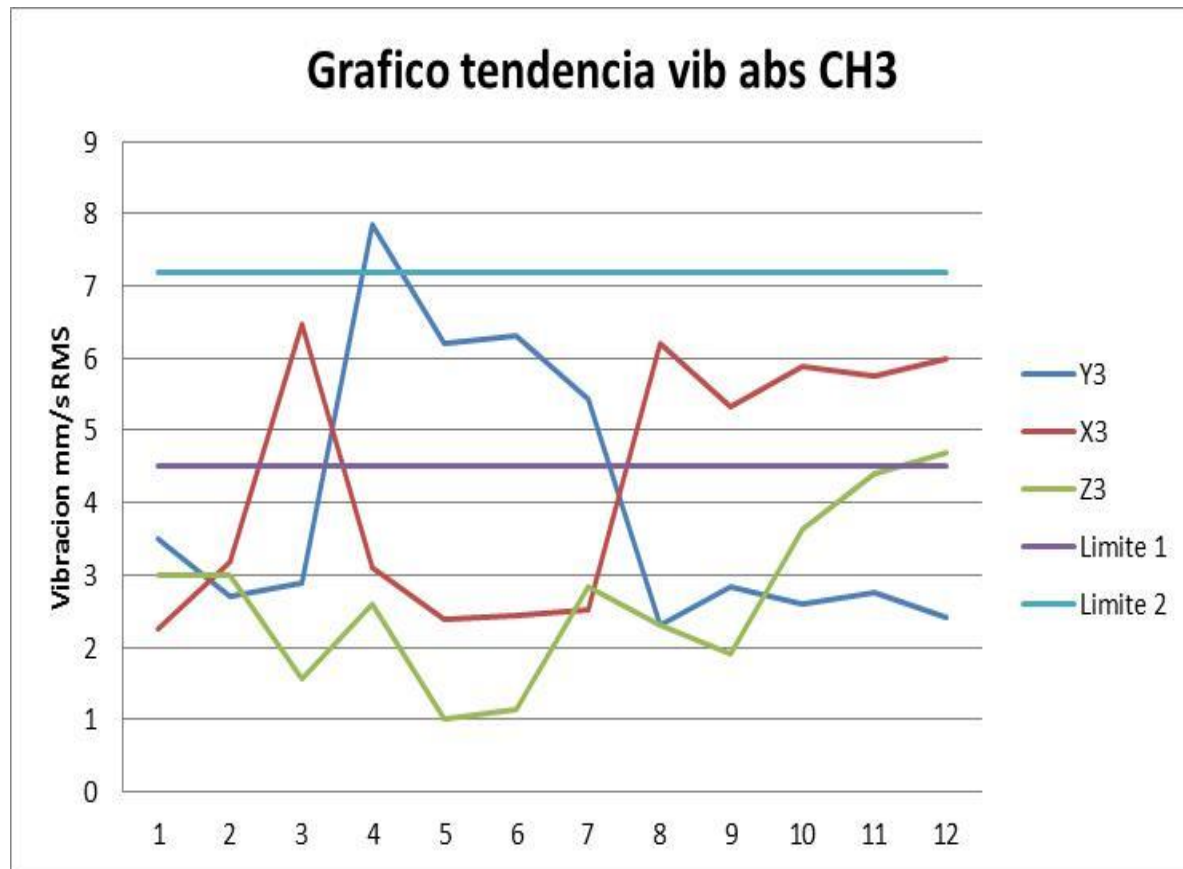


Gráfico 3.2 tendencia del comportamiento de las vibraciones absolutas en CH3.

Dónde: los valores de vibraciones en las 3 direcciones presentan un estado no satisfactorio. Y los límites de severidad de la vibración (lim1 y lim 2), se deben reajustar atendiendo a las probabilidades técnicas de una posible falla del sistema en el tiempo de acuerdo al tipo de defecto.

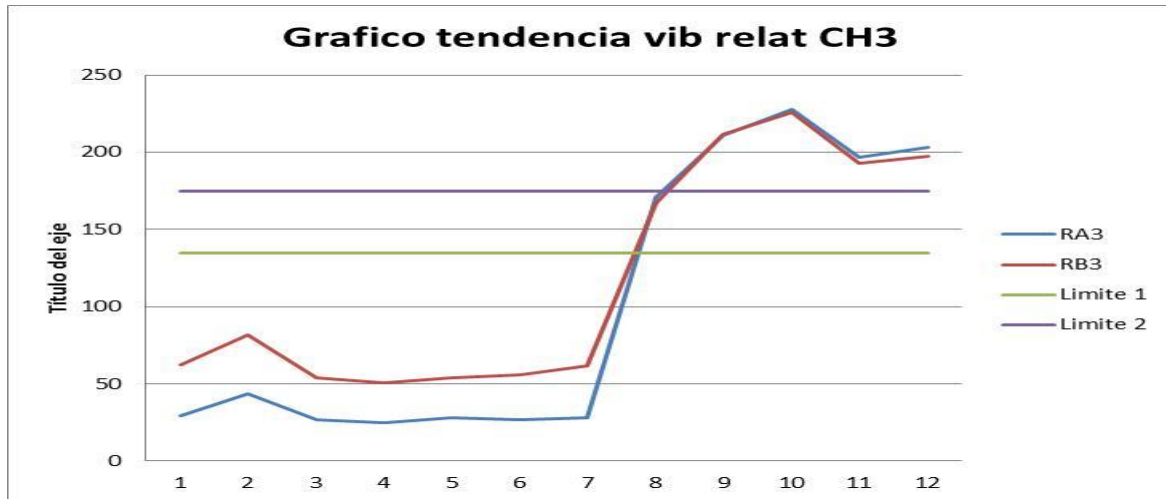


Gráfico 3.3 tendencia del comportamiento de las vibraciones relativas en CH3

Dónde: los valores de vibraciones en las 2 direcciones presentan un estado no satisfactorio. Y los límites de severidad de la vibración (lim1 y lim 2), se deben reajustar atendiendo a las probabilidades técnicas de una posible falla del sistema en el tiempo teniendo en cuenta el tipo de defecto.

3.3- Análisis causa efecto, para valorar técnicamente los posibles cambios en los límites.

Estudios realizados en turbinas permiten acertar criterios de defectos probables en turbina que se resumen en el diagrama Ishikawa o espina de pescado aplicable a la investigación de defectos en turbogrupos, ver esquema Anexo 7. A continuación se resumen a modo de ejemplo las probables causas de vibraciones en las turbinas de la ETC Cienfuegos que a sus efectos son las más comunes según datos históricos de bases de datos.

3.3.1 Defectos mecánicos.

Desbalance mecánico

Desalineamiento mecánico

Excentricidad.

Roses mecánico.

Distribución no uniforme de cargas en chumaceras.

Torbellinos de aceite.

Defectos introducidos por el mantenimiento mecánico

3.3.2 Defectos operacionales.

Variaciones bruscas de carga.

Cambios de temperaturas en vapor sobrecalentado.

Variaciones de la temperatura de escape

Defectos en el vacío.

Variaciones de la frecuencia del sistema. Entre otros

Cada uno de estos defectos tienden a variar el estado vibracional de la turbina, pudiendo ser permanente, transitorios con comportamientos diferentes en el tiempo.

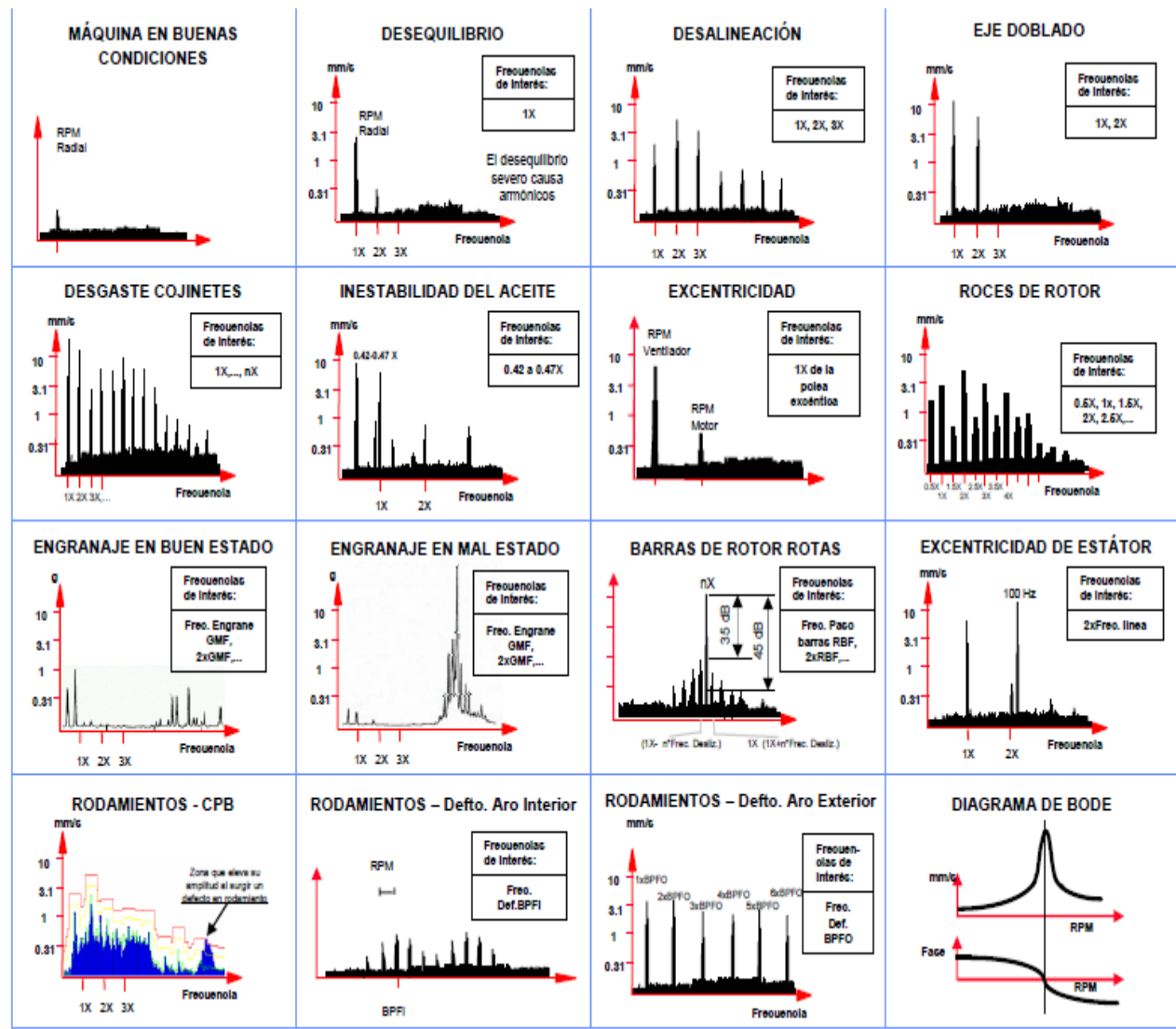
El análisis causa efecto permite en todos los casos, determinar el síntoma del defecto, la causa y la causa raíz del mismo siendo este último la etapa concluyente de todo tipo de falla.

3.4 Análisis de resultados espectrales, análisis de la señal en el tiempo y las fases de las vibraciones

Para lograr central las bases para los cambios en los límites de severidad de las vibraciones como para el ejemplo de la CH3, uno de los aspectos centrales lo constituye un estudio sistemático del comportamiento espectral de las vibraciones entre otros, para lograr determinar la posible causa del cambio de la severidad del mismo.

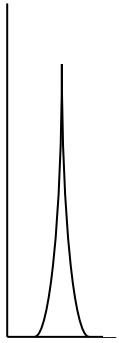
Par este fin se trabaja con tablas de interpretación de espectros como las que aparecen en la figura 3.1 a continuación.

Fig 3.1 Tabla de interpretación de espectros



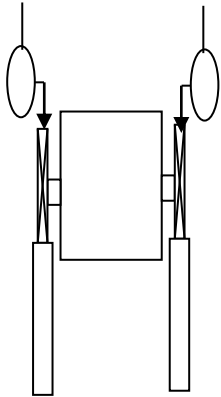
Estos análisis se pueden resumir de conjunto con la fase en las indicaciones metodológicas que aparecen a continuación. Solo se citan algunos ejemplos.

Desbalance de masas



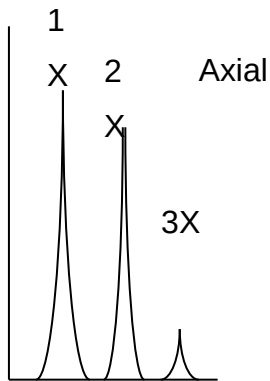
1X

Radial

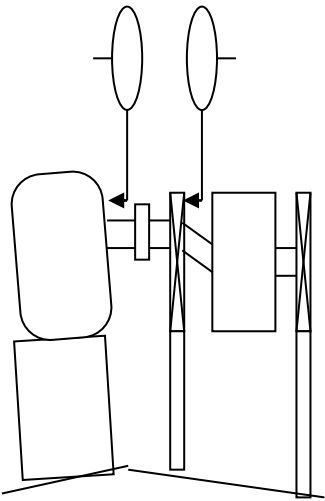


El desbalance de fuerzas estará en fase y será estable. Las amplitudes debido al desbalance se incrementarán, con el cuadrado de la velocidad por debajo de la primera crítica del rotor (el incremento de la velocidad $3x = 9x$ vibración máxima). $1x$ RPM siempre se presenta y normalmente domina el espectro. Puede ser corregido instalando solo un peso de corrección de balance en un plano en el centro de gravedad del rotor (C.G.) Aproximadamente 0° la diferencia de fase que debe existir entre la chumacera exterior (OB) y la chumacera interior (IB) horizontales, así como entre OB y IB verticales. También, aproximadamente 90° entre la dirección vertical y horizontal

Desalineamiento.



El desalineamiento angular se caracteriza por alta vibración axial. 180° de desfase a través del coupling. Típicamente tendrá alta vibración axial en 1X y 2X rpm. Sin embargo, es frecuente que domine 1X, 2X. y 3X.. Estos síntomas pueden indicar también problemas de acoplamiento. El desalineamiento angular severo pueden excitar muchas armónicas de 1X rpm. Por el contrario a las pérdidas mecánicas tipo 3, estos armónicos múltiples no tienen típicamente un fondo de ruido incrementado en el espectro.



3.5 Análisis de posibles defectos. Valoración de los cambios de límites. Vibraciones absolutas y vibraciones relativas.

Uno de los principales aspectos en los cambios de límites lo constituye la causa del defecto, por ejemplo un posible rose, un fuerte desbalance, una flexión permanente en un eje son símbolos inmediatos de parada de una máquina, otros defectos transcientes como los operacionales, desalineamiento, descargas de chumaceras entre otros permiten continuar la explotación del equipo sin probabilidades de roturas significativas. En el ejemplo de análisis chumacera 3, se presenta a continuación la determinación de posibles causas del defecto que altera los niveles vibracionales.

3.5.1 Análisis espectral. Vibraciones absolutas en chumacera

Datos que muestran las mediciones reales tomadas en el comportamiento de la Turbina 3 desde el 2013 al 2015, que sirven como base para determinar cuando se deben realizar cambios en los límites de severidad de las vibraciones absolutas en chumacera 3. Tomados del programa OMNITREND del instruemnto VIBEXpert II.

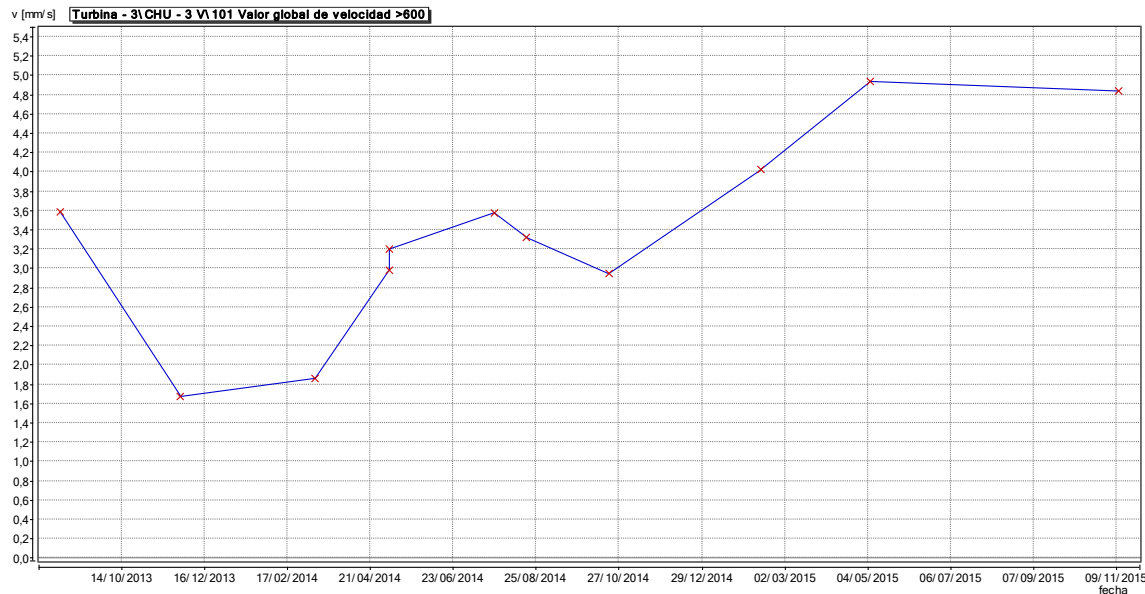


Fig 3.2 Tendencia de las vibraciones Absolutas ch3. Se nota un crecimiento del nivel

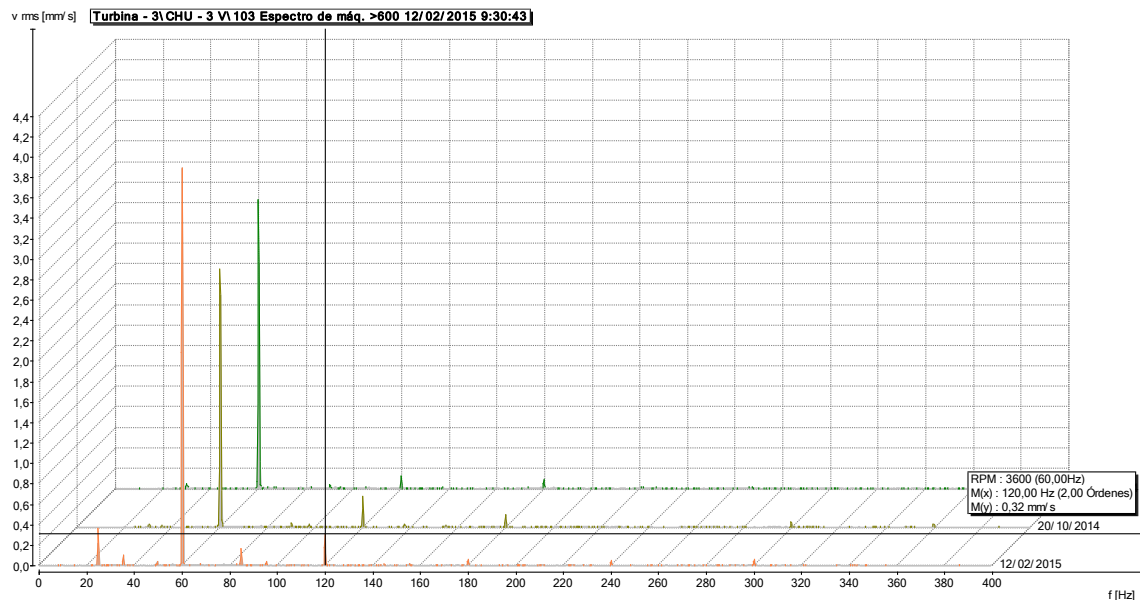


Fig 3.3 Análisis espectral

En este primer espectro, aparecen vibraciones significativas en el armónico rotacional (1X), las cuales indican niveles de desbalance residual, y algunas componentes en menor escala de vibraciones en el 2do y tercer armónico, símbolos de desalineamiento, pero como algo nuevo a diferencia de las restantes mediciones componentes de baja frecuencia que en todos los casos se relacionan con defectos de películas de aceite, descargas específicas de chumaceras, estas vibraciones son transcientes en el tiempo y dependen de varios factores. Variación de linealidad del eje, variaciones de viscosidad del aceite.

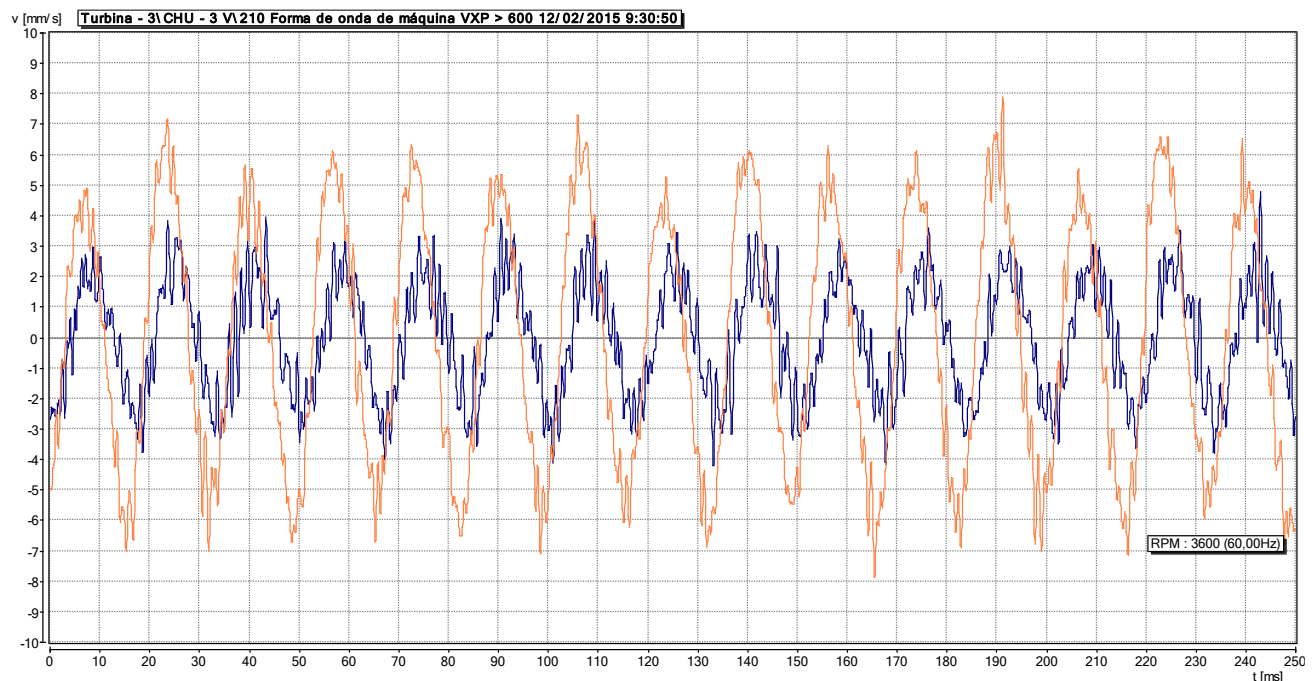


Fig 3.4 Análisis de la señal en el tiempo

En este análisis de la señal en el tiempo se pudo observar el comportamiento de los cambios que se están generando en la chumacera producto de la aparición de vibraciones de baja frecuencia.

La medición de fase mostrada en tabla a continuación nos indica, la presencia del desbalance en turbina en el plano de la ch3 así como indicios de desalineación tomados en el plano ch3 y ch4.

Dirección	Vertical		Horizontal		Axial	
Chumaceras	Vib mm/S	Fase en α	Vib mm/S	Fase en α	Vib mm/S	Fase en α
CH3	4	120 ⁰	5.6	32 ⁰	2.6	240 ⁰
Ch4	4.5	127 ⁰	3.2	30 ⁰	1.97	66 ⁰

Tabla 3.0.Medicione en diferentes fases

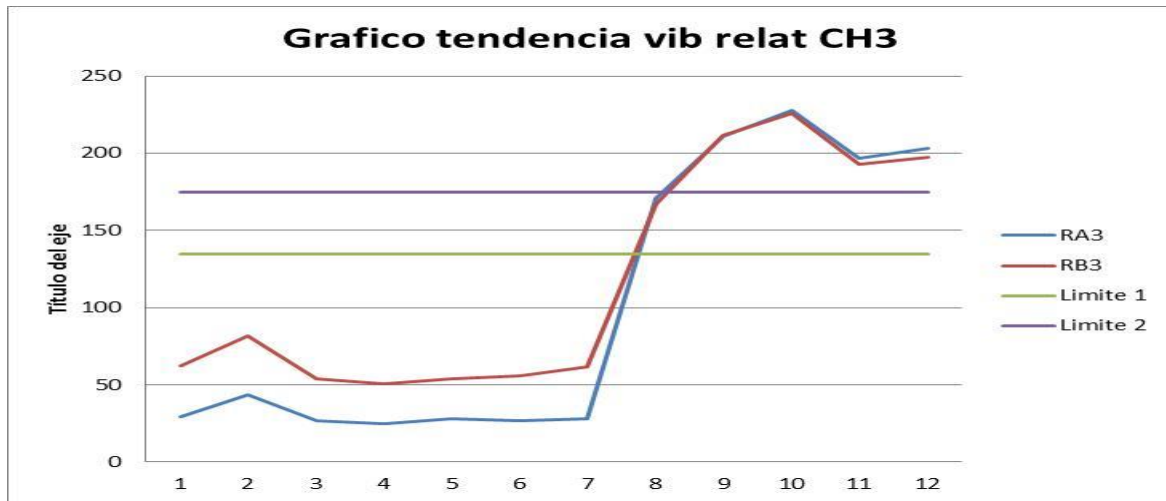
Como resultado final del análisis se puede valorar establecer los cambios en los límites de vibraciones absolutas en la chumacera 3.

3.6 Niveles totales y Análisis espectral de Vibraciones relativas en eje.

La realización de un análisis para posibles cambios de límites en las vibraciones en eje de turbina 3, se realizan a partir de Datos tomados del instrumento Vibrocontrol 400 y Vibrotest 60, que se muestran en el Anexo 9.

Defectos que aparecen que establecen la necesidad de este análisis.

Crecimiento en los niveles total vibraciones relativos en las chumaceras de turbina. Según muestra la tendencia a continuación.

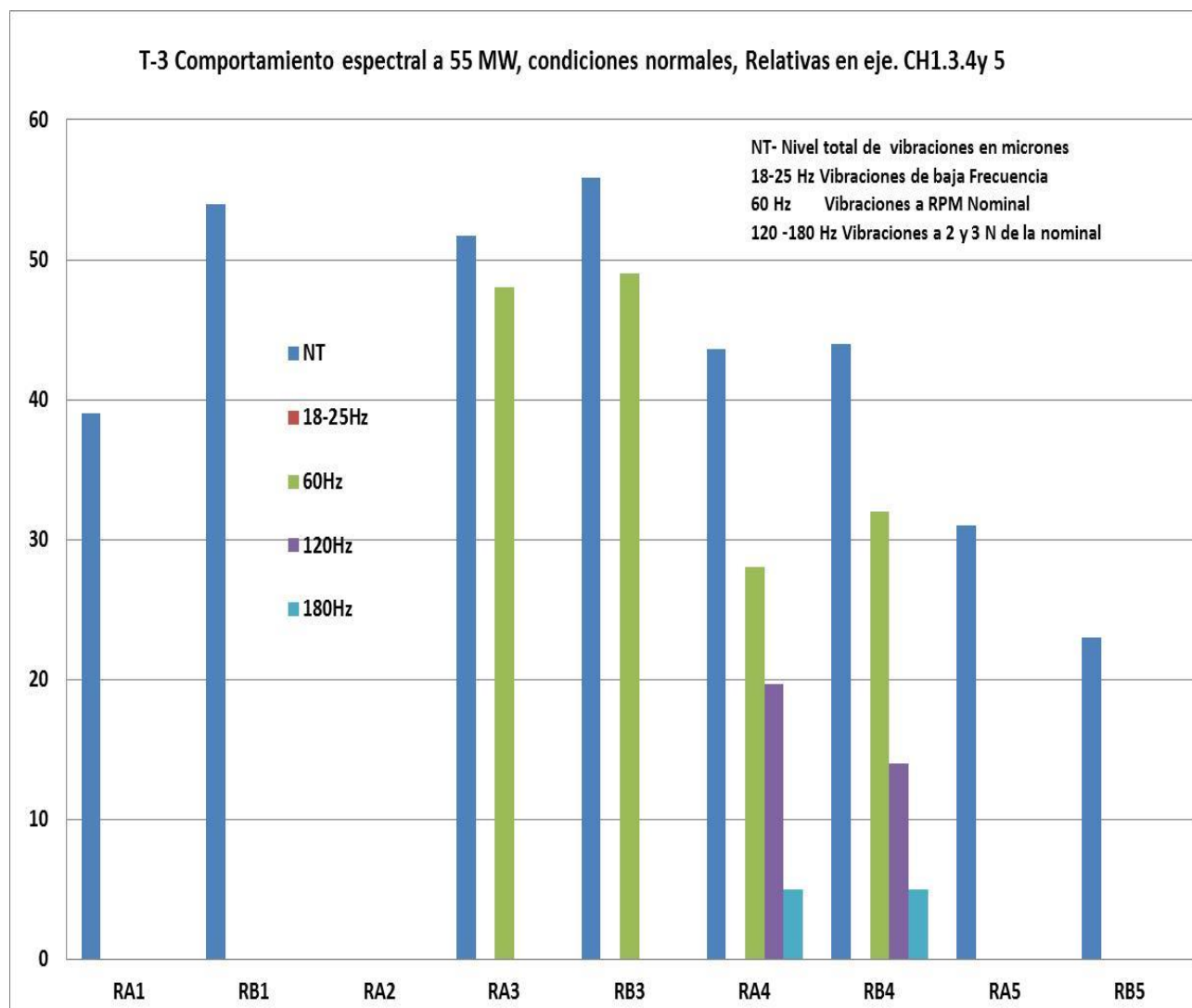


Graf.3.4 Tendencia vibracional nivel total relativa en eje ch3 en el 2014

Como se observa los niveles de vibraciones han excedido los límites preestablecidos para condiciones anteriores estables de trabajo del turbogruppo, base sobre lo cual se realiza un análisis para establecer la probabilidad de un cambio que permite devolver la confiabilidad operacional de la maquina entre pazos del mantenimiento según oportunidad.

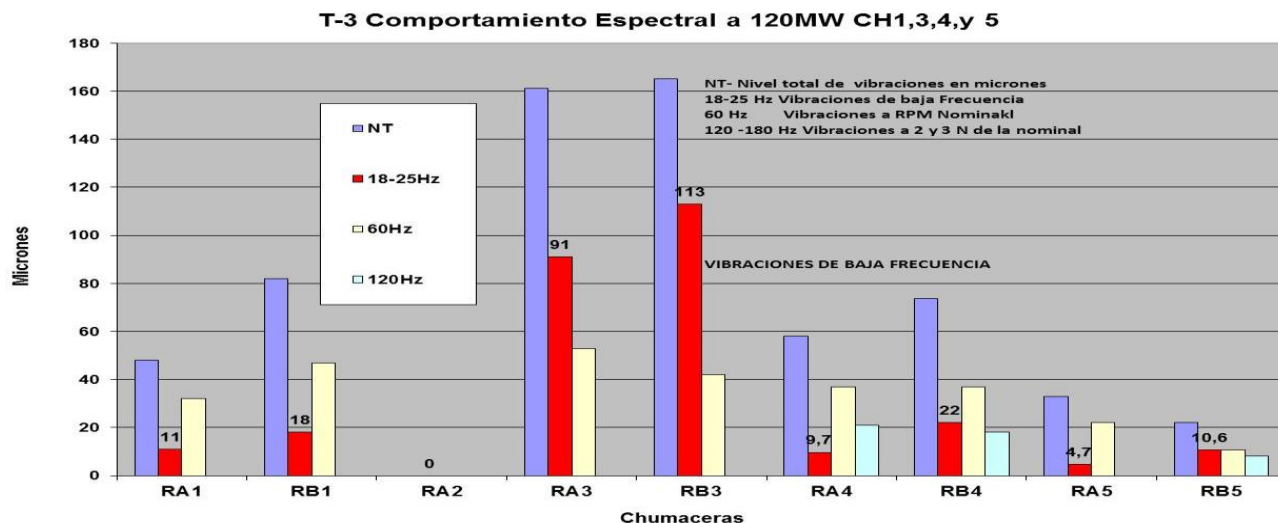
3.7 Análisis de posibles causas. Espectro en chumaceras.

En la base de datos anexo10. Se realiza un análisis espectral de vibraciones en todos los puntos de mediciones de chumaceras de turbina que nos permite valorar las posibles causas de vibraciones en la misma. En las gráficas a continuación se sintetiza el desarrollo de un evento transciente para variaciones de carga donde aparecen vibraciones de baja frecuencia como elemento nuevo de defecto.



Grafica 3.5.Comportamiento relativa en eje

En la gráfica 3.5, se observa que para esta condición de carga solo aparecen defectos relacionados con desbalance residual de turbina (60 HZ), defectos de desalineación (120 y 180 Hz).



Grafica 3.6.Comportamiento espectral

En la Grafica 3.6, se observa para el mismo estado de maquina el cambio de las vibraciones absolutas con el cambio de carga de la turbina. Comparando con la gráfica 11 a 55 MW, aparece una componente de baja frecuencia lo cual significa la aparición de defectos como película de aceite, descarga de chumacera,

Estos defectos como son transitorios nos permiten establecer criterios sin riesgos de realizar cambios en los límites de severidad de las vibraciones.

3.8 VALORACION TEORICA ECUACIONES EVALUATIVAS DE LOS LÍMITES CONDENATORIOS DE LOS NIVELES DE VIBRACIONES.

Las ecuaciones que se indica a continuación permite valorar los cambios proporcionales del crecimiento de las vibraciones, que tienen como fundamento la tendencia actual para corroborar el nivel de severidad de las vibraciones tomadas en niveles totales de estas para las magnitudes Desplazamiento (Pico-Pico) o Velocidad mm/seg (RMS)

$$V_{cr} = \frac{V_{inst} - V_b}{V_b} \quad (3.1)$$

$$V_b = \frac{\sum_{n=1}^n \text{Valor Bien}}{n} \quad (3.2)$$

Donde:

V_{cr} = Valor de cambio o crecimiento.

V_b = Valor Promedio de buen estado de la vibración (Puede ser valores históricos, mejores valores a partir de los mantenimientos probados su eficacia por un periodo mayor a los 6 meses o de Normas Estándar si no tiene los indicadores anteriores)

n = Numero de mediciones históricas de buenos estados de trabajo del equipo.

El valor V_b se puede determinar además por la ecuación:

$$V_b = \frac{V_{inst}}{1 + V_{cr}} \quad (3.3)$$

Donde:

V_{inst} = Máximo valor de las mediciones que puede operar un equipo antes que se produzca su rotura en corto tiempo.

V_{cr} = Valor máximo de cambios para diagnosticar la parada de un equipo se sugiere valores mayores que 4 para la magnitud desplazamiento P-P y hasta 10 para la magnitud Velocidad RMS.

El valor Vibraciones bien (Vb) técnicamente depende de:

- Calidad con que se desee manejar los niveles de explotación de los equipos en base alargar o no la vida útil de estos, asociado a defectos que generan averías a largo plazo.
- Del criterio económico sobre las pérdidas que puede o no ocasionar la salida de un equipo por averías imprevistas.
- Costos de mantenimiento del equipo en análisis.

Se recomienda para los equipos categoría "A" que los valores de Vb sean los promedios de estados Excelentes que y que además se correspondan con valores históricos o recomendados por el fabricante.

3.9 EVALUACION PRÁCTICA.

En el **Anexo 1** Se presentan los resultados a modo de ejemplo(Turbina 3), el trabajo realizado en todos los Puntos (Chumaceras) del sistemas de turbina generador, en el mismo se puede observar los cálculos y estimaciones de los valores promedios a partir de datos históricos, tomados por puntos de mediciones de vibraciones en cada una de las chumaceras según se observa en el caso ejemplo.

Los cálculos del **Anexo 2**, se realizaron acorde al **ecuación 3.3** que aparece anteriormente, tomando como base los datos de niveles totales de vibraciones durante el año 2014-2015, con el instrumento de primer nivel VIBXPert II y Vibrocontrol 4000. para realizar el cálculo del valor Vb, se toman los valores más bajos que alcanza el equipo y con su promedio se establecen los nuevos valores de cálculos de los límites de vibraciones.

3.10 Calculo de valor de cambio de vibraciones absolutas en CH3

MES -AÑO	Y3	X3	Z3
enero	3,5	2,26	2,99
febrero	2,7	3,19	3
marzo	2,9	6,46	1,57
abril	7,84	3,1	2,6
mayo	6,2	2,39	1
junio	6,3	2,45	1,15
julio	5,43	2,53	2,84
agosto	2,3	6,2	2,3
septiembre	2,83	5,34	1,9
octubre	2,6	5,89	3,64
noviembre	2,76	5,76	4,39
diciembre	2,42	6	4,7
Promedio	3,98	4,30	2,67
Valor Vb	2,75	2,65	1,75

Tabla 3.1.Valor Vb

MES -AÑO	Y3	X3	Z3
enero	3,5	2,26	2,99
febrero	2,7	3,19	3
marzo	2,9	6,46	1,57
abril	7,84	3,1	2,6
mayo	6,2	2,39	1
junio	6,3	2,45	1,15
julio	5,43	2,53	2,84
agosto	2,3	6,2	2,3
septiembre	2,83	5,34	1,9
octubre	2,6	5,89	3,64
noviembre	2,76	5,76	4,39
diciembre	2,42	6	4,7
Promedio	3,98	4,30	2,67
Vinst	6,44	5,94	3,71

Tabla 3.2 Valor Instantáneo Vinst

De las tablas 3.1 y 3.2 se puede desarrollar la siguiente ecuación para el cálculo del Valor de crecimiento (Vcr) para vibraciones absolutas en CH3

$$V_{cr} = \frac{V_{inst} - V_b}{V_b}$$

$$V_{cr} = \frac{6.44 - 2.75}{2.75}$$

$$V_{cr} = 1.341$$

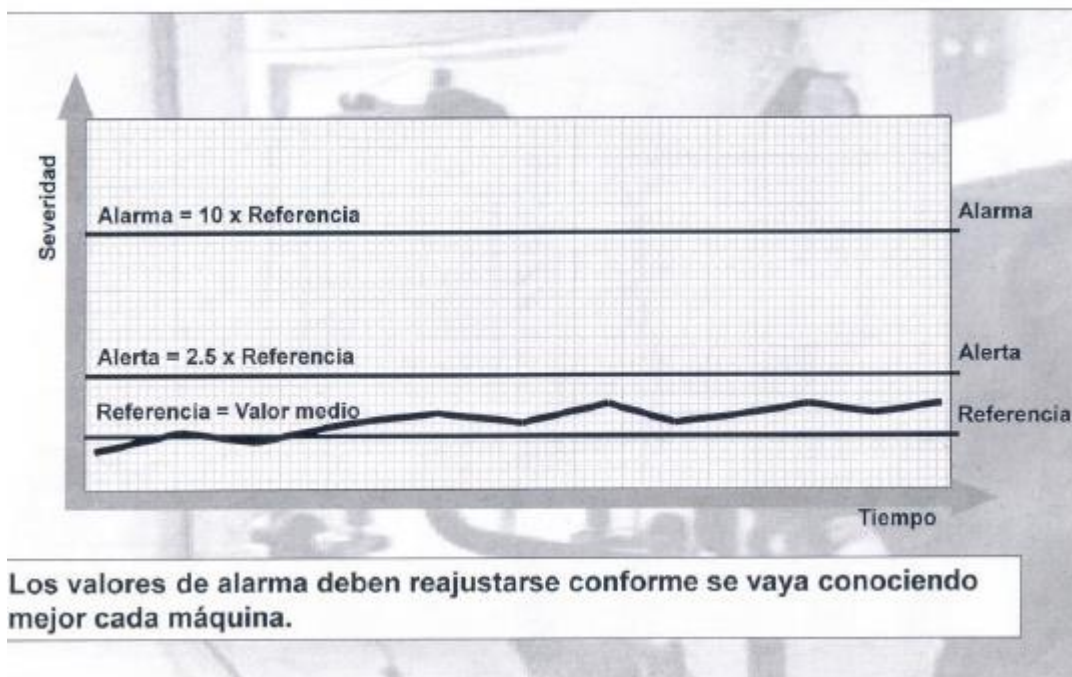


Fig 3.5. Curva para cambio de limites

El valor Vb al multiplicarlo por 2.5 obtenemos el valor del límite 1 que seria

$$V_b \cdot 2.5 = \text{limite1}$$

$$\text{Limite1} = 6.8 \text{ mm/s}$$

Para establecer el limite2 multiplico el Vb por 3.5

$Vb \times 3.5 = \text{limite2}$

Limite2=9.6 mm/s

3.11 Calculo de valor de cambio vibraciones relativas CH3

MES -AÑO	RA3	RB3
enero	29,7	62,3
febrero	43,5	81,7
marzo	27	54
abril	25	51
mayo	28	54
junio	27	56
julio	28	62
agosto	171	167
septiembre	211	211,7
octubre	228	226
noviembre	197	193
diciembre	203	197,4
Promedio	101,52	118,01
Valor Vb	27,45	56,55

Tabla 3.3.Valor Vb

MES -AÑO	RA3	RB3
enero	29,7	62,3
febrero	43,5	81,7
marzo	27	54
abril	25	51
mayo	28	54
junio	27	56
julio	28	62
agosto	171	167
septiembre	211	211,7
octubre	228	226
noviembre	197	193
diciembre	203	197,4
Promedio	101,52	118,01
Vinst	212	218,85

Tabla 3.4.Valor Vinst

De las tablas anteriores se puede desarrollar la siguiente ecuación para el cálculo del Valor de crecimiento (Vcr) para vibraciones relativas en CH3

$$V_{cr} = \frac{V_{inst} - V_b}{V_b}$$

$$V_{cr} = \frac{218.85 - 56.55}{56.55}$$

$$V_{cr} = 2.87$$

El valor Vb al multiplicarlo por 2.5 obtenemos el valor del límite 1 que seria

$$V_b \cdot 2.5 = \text{limite1}$$

$$141.37 \text{ micrones} = \text{Limite1}$$

Para establecer el limite2 multiplico el Vb por 3.5

$$V_b \cdot 4.5 = \text{limite2}$$

$$254.47 \text{ micrones} = \text{Limite2}$$

3.12 Variación de los límites de vibraciones Absoluta y Relativo en eje CH3

Los límites se calcularon sobre las bases de tendencias actuales de acuerdo a (Valores de Crecimiento) entre 2.5 a 6 Veces los valores Base Promedio. Mejores de cada punto en cuestión.

Teniendo en cuenta los defectos conocidos del turbogrupo, así como la veracidad de la vibración, que además nos permite trabajar con holguras según las normas para estos fines, se plantea los cambios en los límites que aparecen en la siguiente tabla de trabajo. Para el caso CH3 vibración absoluta dirección Axial y vertical respectivamente, y vibración relativa en eje CH3.

Tabla 3.5.Límites propuestos

Vibraciones absolutas en chumaceras en tres direcciones mm/s RMS					Vibraciones relativas en eje en micrones	
CHUMACERAS	LIMITES	Vertical Y1	Horiz. X1	Axial Z1	Vibra- Relativa R1A	Vibra- Relativa R1B
Chumacera 3	LIMITES	Vertical Y3	Horiz. X3	Axial Z3	Vibra- Relativa R3A	Vibra- Relativa R3B
	Lim Inferior	6.8	6.8	<u>6.8</u>	142	142
	Lim Superior	9.6	9.6	<u>9.6</u>	255	255

Recomendación:

Los valores de límites indicados en la tabla se deben llevar a los niveles de vibraciones, que se indican en la misma como valores de cambio, lo cual obedece a las siguientes observaciones.

- 1.- Según la norma **ISO 10816-3**, es permisible con un nivel de seguridad confiable establecer estos nuevos límites ya que los rangos de las mismas lo admiten, para el caso Vibración absoluta en CH3 dirección Axial. Si se conoce como en este caso la posible causa de la alteración de la vibración en turbina.
- 2.- Según la Norma DIN ISO 7919-2, es permisible realizar los cambios que se proponen en los límites de las vibraciones relativas en eje para el caso CH3.
- 3.- Se añaden otros criterios como los límites de las vibraciones de baja frecuencia existentes en la turbina deben estar por debajo del 30 al 40 % de las holguras de las chumaceras, condición para la cual se evita cualquier tipo de roce, este punto se ha cumplido en todos los casos en las diferentes condiciones medidas en máquina.
- 4.- Según las normas API EEUU se pueden llegar como límites a 277 Micrones en eje.

La aceptación de estos criterios está avalada por las recomendaciones y revisiones hechas al caso por los especialistas de la EMCE Habana del Grupo Análisis Dinámico, en la persona Dr.Ing. Francisco Mourdoch y el especialista en diagnóstico de la Termoeléctrica MSc Ing Silvino Chaviano.

A continuación se añaden algunos criterios prácticos para el dominio de límites de las vibraciones

3.13 Criterios de aceptación de los límites.

Límite 1 o Primera Alarma (señales en amarillo en el bombillo indicador): se establece entre 2.5 y 3.2 veces los valores buenos de operación del equipo, este nos da información de que están ocurriendo cambios o defectos en el equipo, o de otra manera que existen parámetros de operación que están relacionados con defectos del sistema, que alteran los niveles de vibraciones.

Estos valores por lo general pueden tener varias causas.

Errores de explotación o alteraciones de algunos parámetros de turbina como:

Variaciones de temperaturas en el escape del turbogruppo, variaciones de temperaturas de vapor sobrecalentado, Variaciones considerables de la frecuencia del sistema, cambios bruscos de carga en el turbogruppo, alteraciones en las temperaturas de trabajo de los lubricantes o las pérdidas de algunas de sus propiedades como la viscosidad, otros. Todos y cada uno de estos tienen un rango permisible, que están entre un 5 y 10 % de variación de los nominales o de diseño. A partir de lo cual pueden afectar el nivel vibracional de las turbinas.

Defectos nacientes en los sistemas mecánicos como: Flojedad mecánica en pernos de anclajes, pérdidas de holguras en películas de aceite, descargues de chumaceras, roces de sellos, flexiones locales de eje por diferencias de temperaturas transciendes, otros.

La información que puede aportar estos valores en el primer limite, es la sensibilidad de la maquina a las variaciones siempre y cuando no sean fijos o permanentes con el tiempo los cambios. Si los cambios son permanentes simbolizan que a ocurrido un defecto mecánico en la maquina.

Nota: los valores de la Primera alarma permiten en casi todos los casos continuar una operación eficiente de la turbina, sin riesgos insuperables.

Limite 2 o Segunda Alarma (señales en rojo en el bombillo indicador)

El limite 2 se establece a partir de 6.3 veces los valores buenos de vibraciones, estos valores son el indicio de un defecto creciente en las turbinas, pudiendo ser el mismo controlables o no, dependiendo solo de la posible causa que de origen al mismo.

Las causas relacionadas con defectos de parámetros de trabajo nominal de la maquina, son por lo general recuperables una vez restablecidos los mismos,

Las causas relacionadas con defectos mecánicos, por lo general no son recuperables, y tienden a permanecer constantes en el tiempo.

Los niveles vibracionales asociados **a la alarma 2** son indicadores de atención a la evolución de la maquina y por lo general síntomas de cercanías a los estados de dar mantenimiento a los componentes de alguna parte del sistema de las mismas,

Por lo cual siempre se debe tener una posible información del probable defecto para emitir criterios si se puede o no continuar la explotación de la maquina.

El valor de los límites nuevos responde al nivel de crecimiento, teniendo en cuenta análisis históricos de comportamiento valorando además los niveles de crecimiento que estandarizan las normas de severidad como lo que se muestra en la gráfica anterior.

Del estudio anterior se realizan los cambios de límites que se reflejan a continuación en las sucesivas gráficas, que a su vez comparan los límites anteriores que se corresponden con valores adaptados a las condiciones de maquina nueva y en otros casos con recientes mantenimientos que le han devuelto mejoras técnicas.

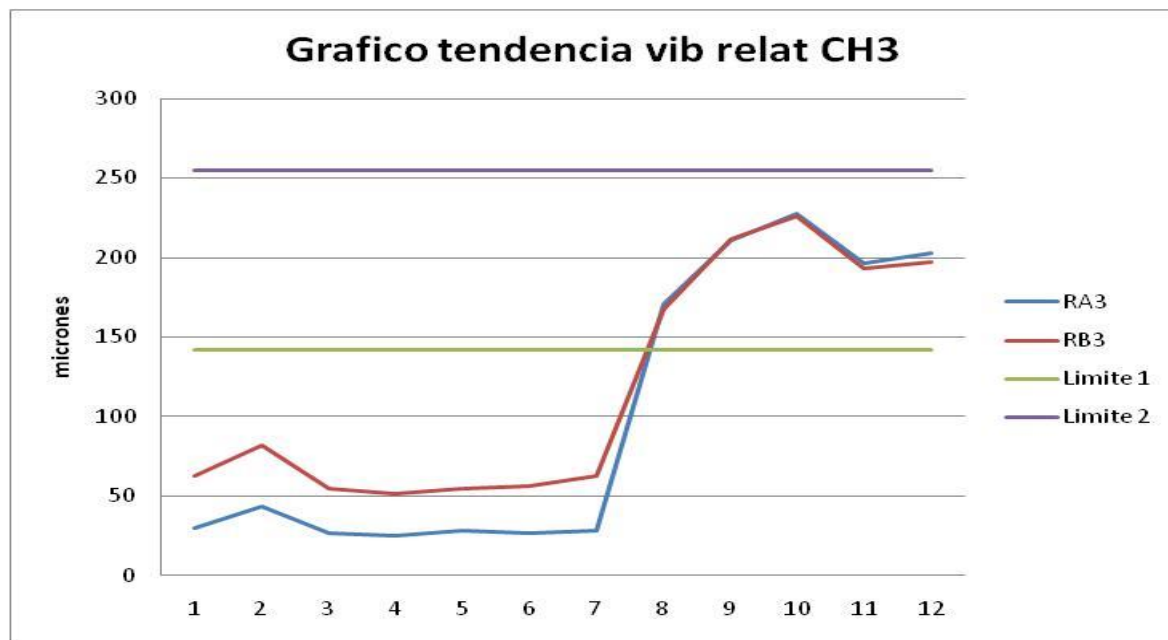
Estos valores procesados nos permitieron determinar:

- ❖ Los valores promedios de vibraciones con que han operado los equipos por direcciones de chumaceras.
- ❖ Los mejores valores de vibraciones con los que han operado estos equipos durante un periodo superior a los 6 meses en cada caso.
- ❖ El cálculo del valor denominado Bueno (V_b). Que es la base de comparación de los demás estados de vibraciones de los equipos.
- ❖ Los niveles más altos de vibraciones con que han operado los dispositivos sin llegar a las fallas.

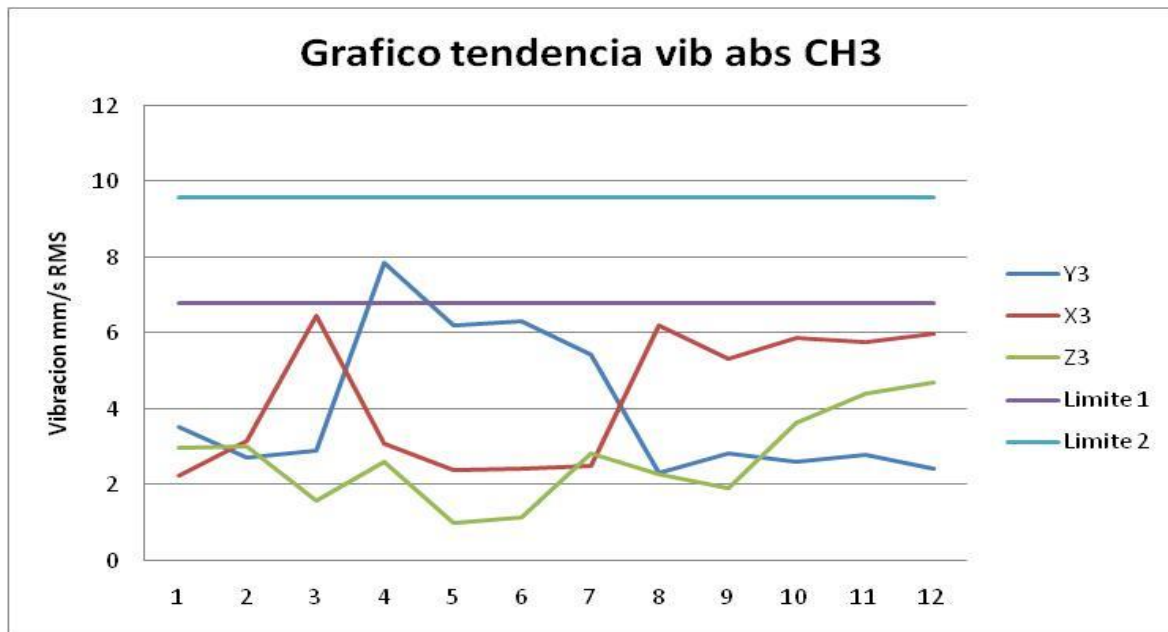
Como resultado de todo este proceso de trabajo descrito anteriormente se pudo obtener finalmente la Tabla dinámica de Severidad de las Vibraciones cuyos resultados se exhiben en el **Anexo 3**. La valoración del estado técnico de los equipos rotatorios con los criterios que nos proporciona esta tabla nos ha permitido:

- ❖ Continuar la explotación de los equipos con más de 30 años de servicio, con una evaluación aceptada de su estado técnico acorde a sus condiciones y modos de comportamientos históricos del parámetro vibraciones,
- ❖ Preestablecer los criterios relacionados con el mantenimiento Preventivo Planificado fallas con una mayor claridad.
- ❖ Predecir las posibles fallas y sus causas con la anticipación necesaria para evitar la impredecible avería.

En los gráficos de tendencia mostrados a continuación se puede observar que con los nuevos límites propuestos las vibraciones están en un buen nivel de confiabilidad para el uso continuo de la turbina 3



Graf 3.7 Tendencia Vib relativas sobre limites propuestos



Graf 3.8

Tendencia Vib Absolutas sobre límites propuestos

Conclusiones:

La valoración presentada y efectuada ha permitido:

- Continuar con la explotación de turbina 3 durante estos últimos años en víspera a la modernización donde se puede resolver definitivamente los defectos de turbina.
- el cambio de limites permite mejorar la atención del operador a los cambios que se producen en maquina ya que evita mantener una señal de defecto ya conocido, que a su vez valora nuevos cambios a partir de los defectos ya conocidos.
- permite además valorar en cada intervención que se hace un maquina una posible mejora adaptada al tiempo del mantenimiento
- Esta metodología es aplicada a todos los equipos roto dinámicos de la CTE Carlos Manuel de Céspedes a los cuales se le propusieron nuevos límites ya que por la orientación del fabricante tendrían que estar fuera de servicio.

CAPITULO 4. RESULTADOS TÉCNICO-ECONÓMICO OBTENIDOS A PARTIR DE LA APLICACIÓN DEL SISTEMA DE MANTENIMIENTO BASADO EN LA CONDICIÓN.

INTRODUCCIÓN.

La introducción de la metodología practica para los cambios paulatinos en la aplicación de las normas de severidad de las vibraciones ISO 10816-3 por valores patrones históricos ha permitido resultados Técnico-Económicos como los que se muestran a lo largo del desarrollo de este capítulo, donde se presentan una relación comparativa de las cantidades de averías antes de aplicar los cambios de límites de operación y posterior a su aplicación. A su vez se realiza una comparación de los gastos por costos indirectos (mano de obra y materiales) antes del Cambio de límites y posterior a la imposición de estos. Las ganancias que ha aportado la introducción de la nueva metodología a los equipos fundamentales categoría "B".

4.1 Resultados Técnico-Económico del comportamiento de las Averías.

4.1.1 Análisis Comparativo de las Averías producidas en ambos períodos

La relación que se presenta en la tabla de la **Figura 4.0** muestra el comportamiento de las averías comprendidas en dos etapas, antes de comenzar la introducción de la metodología de cambio de límites y posterior a su aplicación en la que podemos destacar la efectividad del diagnóstico en equipos Roto-dinámicos a partir de la aplicación de esta práctica metodológica.

Sistemas Rotatorios	Averías Antes Cambio de limites	Averías Después del Cambio de limites	Diferencia	% de Disminución
Bomba Agua Alimentar	53	50	3	5.66
Ventilador Tiro Forzado	49	15	34	69.38
Bomba Circulación	42	7	35	83.33
Bomba Petróleo	28	7	21	75
Ventilador Tiro Inducido	16	7	9	56.25
Bomba Condensado	3	0	3	100
Totales	191	86	105	54.97

Figura 4.0. Cantidades de averías por períodos antes y después del cambio de límites

Del análisis de la tabla **Figura 4.0**, se puede observar una reducción de un 54.97% de las averías por energía indisponible en el grupo de equipos **categoría B** sometidos al Cambio de limites que significan 105 averías menos en este período de análisis.

Se debe significar que la disminución de las averías en el Sistema Agua de Alimentar, no resulto mayores que 5.66 %, al no contarse en el período de prueba con bombas de reserva en las Unidades Japonesas producto de averías en los motores de recambio.

4.1.2. Ganancias Bruta por disminución de la Energía Indisponible (E.I).

Indicador	Unidad de Medida	Período antes del cambio de limite	Período después del cambio de limites
Pérdida Valor de Producción	MW	63231.93	26512.67
Costo Producción promedio	Pesos/MW	31.6	31.6
Costo de las Pérdidas	Pesos	1998128.988	837800.372
Costo Promedio de Pérdidas	Pesos/Año	285446.99	139633.395
Ganancia Bruta	= Pérdidas Prom. (89-95) – Pérdidas Prom. (96-01) = \$145813,595 / año.		

Figura 4.1. Ganancia Bruta generada por disminución de Energía Indisponible

Costo promedio del MW = \$ 31.6

4.2 Inversiones realizadas durante la introducción de la metodología de cambio de límites de severidad de las vibraciones.

La introducción de la metodología de cambio de límites en el sistema de mantenimiento, requiere de gastos en recursos para lograr mantener continuidad y calidad durante el control y análisis de los parámetros de vibraciones . Para el logro de este propósito es necesario, introducir gastos en mano de obra y en las nuevas técnicas, traduciéndose todo esto en la inversión necesaria para el desarrollo del proceso del Diagnóstico.

En la tabla de la Figura 4.2 aparece un resumen de los gastos promedios tomados en 12 meses, que nos permite realizar la valoración económica de los Gastos por Inversión.

AÑO 2014	Antes del cambio de limites	Después del cambio de limites	Promedio Anual
Para un año de trabajo.	Horas/Hombres	Horas/Hombres	Horas/Hombres
Total horas hombres en Monitoreo Periódico	844	723	783.5
Total de horas en Mediciones y Análisis Técnico	1570	1550	1560
Horas/Hombre total			2343.5 Hrs
Gastos en Mano de Obra Total			\$ 3364,743
Inversión : Gastos en Instrumento para Diagnóstico			\$ 18000.00
Gasto Total de Inversión (Mano de obra y Recursos materiales)			\$ 21364,743

Figura 4.2. Gasto Promedio de Inversión (Mano de Obra, Materiales)

De los resultados de la tabla anterior, se puede ver la utilidad de la introducción de la metodología desarrollada al incurrirse durante su aplicación en:

- ❖ Bajos gastos de inversión anual por mano de obra en proceso de inspección y Análisis.
- ❖ Bajos gastos en la inversión inicial de instrumentos de diagnóstico.

Todo esto se hace evidente si le comparamos con las ganancias que ha generado los cambios de límites de severidad de las vibraciones según se muestra en el siguiente epígrafe.

4.3 Cálculo de Ganancia Neta por disminución de la Energía Indisponible por años.

Como resultados de los cálculos y análisis realizados en los epígrafes anteriores se puede llegar a determinar la Ganancia Neta en que se ha incurrido durante la introducción del MBC, a continuación se presenta un resumen de la misma

Cálculo de la Ganancia Neta.

De los resultados de las tablas de las **Figuras 4.1 y 4.2** se obtienen los datos necesarios para el cálculo económico de la Ganancia Neta que se presenta a continuación.

Ganancia Neta = Ganancia Bruta + Ganancia por Gastos Indirectos – (Gastos en Inversión)

Ganancia Neta = (145813,595 + 8948.57) – 21364,743

Ganancia Neta = 133397,422 Pesos por años.

CONCLUSIONES

En este Capítulo se ha desarrollado una Análisis Económico de la evaluación de la introducción de la metodología para la introducción en el mantenimiento por diagnostico los limites de severidad de las vibraciones a partir de valores históricos.

Esta evaluación se realiza sobre los dispositivos que más influencia han tenido sobre la indisponibilidad de la Central en el periodo de tiempo desde 2014-2015

El resultado de este análisis ha reportado una ganancia de: **133397,422 Pesos.**

Conclusiones Generales

- La valoración presentada y efectuada ha permitido:
- Continuar con la explotación de turbina 3 durante estos últimos años en víspera a la modernización donde se puede resolver definitivamente los defectos de turbina.
- el cambio de límites permite mejorar la atención del operador a los cambios que se producen en maquina ya que evita mantener una señal de defecto ya conocido, que a su vez valora nuevos cambios a partir de los defectos ya conocidos.
- Permite además valorar en cada intervención que se hace un maquina una posible mejora adaptada al tiempo del mantenimiento
- Esta metodología es aplicada a todos los equipos roto dinámico de la CTE Carlos Manuel de Céspedes a los cuales se le propusieron nuevos límites ya que por la orientación del fabricante tendrían que estar fuera de servicio
- se ha desarrollado una Análisis Económico de la evaluación de la introducción de la metodología para la introducción en el mantenimiento por diagnostico los límites de severidad de las vibraciones a partir de valores históricos.
- Esta evaluación se realiza sobre los dispositivos que más influencia han tenido sobre la indisponibilidad de la Central en el periodo de tiempo desde 2014-2015
- El resultado de este análisis ha reportado una ganancia de: **133397,422 Pesos**

Bibliografía

- Argüelles, J. A. (1987). *Mediciones de eventos mecánicos dinámicos*. La Habana: Pueblo y Educación.
- Caram, D. P. (1990). Desarrollo del programa de mantenimiento por diagnóstico en la Refinería “Nico López. *Revista Tecnológica*, XX, (1).
- Cárdenas Parra, R. (2005). Ingeniería de Mantenimiento, Conceptos Generales. Cienfuegos: Empresa Termoeléctrica “Carlos Manuel de Céspedes”
- Castillo Morales, G. (1999). Mantenimiento a Equipos, Maquinas e Instalaciones. Cienfuegos: Universidad de Cienfuegos “Carlos Rafael Rodríguez”
- De la Torre S. F., Arce Miranda, J. C., Cintado Hidalgo R., Nieves Quintana, E & Sierra Luque, D. (2008). Influencia de los parámetros de proceso, en el comportamiento del parámetro, vibración absoluta, en turbinas a vapor, 2.
- De la Torre, S. F. (s.f). Características vibro acústicas más significativas de los turbo grupos de 100 MW, (Artículo Proceedings CCIM 2000). La Habana: ISPJAE, CEIM. Facultad de Ingeniería Mecánica.
- Díaz, S. (2003). *Medición y Análisis de Vibraciones*. Bolívar, Universidad Simón.
- Fernández García, S. (1994a). Diagnóstico Integral. Santa Clara: Universidad de las Villas.
- Fernández García, S. (1994b). Metodología Diagnóstico Integral Para Centrales y Sub-Estaciones Eléctricas. Cienfuegos: Empresa Termoeléctrica “Carlos Manuel de Céspedes”
- González Jorge, J. D. (2005). *Estudio para la determinación de la relación estadística entre los parámetros de vibraciones relativa y los parámetros no vibratorios de un turbogruppo de la Central Termoeléctrica “Este Habana” (Santa Cruz del Norte)*. La Habana: ISPJAE. Facultad de Ingeniería Mecánica.
- Leiva Castro, D., Batista Garrido, L., Chaviano Bernal, S & Rafael Gómez. (1996). Metodología y Diseño para la Implantación del Sistema Alternativo de Mantenimiento a Equipos Rotatorios en la CTE Carlos Manuel de Céspedes. Cienfuegos: Empresa Termoeléctrica “Carlos Manuel de Céspedes”. Departamento CEE.
- Martínez León, Á. R. (1999a). *Algunas Consideraciones Sobre el Desbalance Mecánico y las Técnicas de Análisis por Vibraciones en el Mantenimiento*. Cienfuegos:

Universidad de Cienfuegos. Departamento de Mecánica.

Martínez León, Á. R. (1999b). *Consideraciones Sobre el Desbalance Mecánico y las Técnicas de Análisis por Vibraciones en el Mantenimiento*. Cienfuegos: Universidad de Cienfuegos. Departamento de Mecánica

Morrow L. C. (1973). *Manual de Mantenimiento Industrial*. México: CECSA.

Mourdoch Morán, D. (2009). *Análisis de los sistemas de monitoreado instalados en los turbo grupos de las principales centrales termoeléctricas cubanas*. La Habana: ISPJAE, CEIM. Facultad de Ingeniería Mecánica.

Norma de operación. "Normas de operación de la turbina K-100-130-3600/2". (2014). Cienfuegos: Empresa Termoeléctrica "Carlos Manuel de Céspedes"

Oliva Calzadilla, D. (2001). *Caracterización del sistema de supervisión de turbina en los turbo grupos de 64 MW correspondiente a las CTE de Regla y Tallapiedra*". La Habana: ISPJAE. Facultad de Ingeniería Mecánica.

Palomino Marín E., Guillén Brito Y., & Soto Salvá N. (2008). Influencia de los parámetros tecnológicos y de proceso en el comportamiento vibratorio de un turbo grupo de 100 MW. La Habana: ISPJAE. Facultad de Ingeniería Mecánica.

Palomino Marín, E. (1996). *Vibroacústica aplicada al diagnóstico de máquinas rotatorias*. La Habana: ISPJAE. Facultad de Ingeniería Mecánica

Palomino Marín, E. (2001). *Elementos de medición y análisis de vibraciones en máquinas rotatorias*. La Habana: ISPJAE.

Rivero Ávila, R. J., Valdés Moreira., & Chaviano Bernal, S. (1990). *Mantenimiento por Diagnóstico y Balance de Equipos Rotatorios en Centrales Termoeléctricas* (Trabajo de Diploma). Cienfuegos, Centro Politécnico "5 de Septiembre.

Royo Jesús, A. (s.f). Análisis de Vibraciones e Interpretación de Datos. Retrieved from <http://www.google.com>.

Anexos

Anexo 1

BASE DE DATOS PARA ANÁLISIS DE VIBRACIONES TURBINA 3. AÑO 2014

MES-AÑO	Y1	X1	Z1	Y2	Y3	X3	Z3	Y4	Y5	X5	Z5
enero	0,8	0,8	1,3	0,59	3,5	2,26	2,99	3,4	3,1	2,73	3,31
febrero	0,87	0,86	0,78	0,56	2,7	3,19	3	3,6	3,1	2,48	3,4
marzo	1	0,9	1,1	0,59	2,9	6,46	1,57	3,3	2,89	2,72	3,56
abril	1,41	1,19	0,67	4	7,84	3,1	2,6	4,17	2,66	2,55	4,09
mayo	0,65	1	0,68	2,41	6,2	2,39	1	5,1	2,7	2,8	4,2
junio	0,91	0,87	0,84	2,55	6,3	2,45	1,15	4,65	2,76	2,66	3,64
julio	0,79	0,89	0,67	2,68	5,43	2,53	2,84	4,67	2,78	2,78	4,04
agosto	1,2	1,5	1	3,26	2,3	6,2	2,3	4,59	2,9	2,9	3,1
septiembre	1,9	1,9	1,18	3,42	2,83	5,34	1,9	4,4	2,9	2,9	3,8
octubre	1,5	1,5	0,96	3,41	2,6	5,89	3,64	4,45	2,75	3,06	4,48
noviembre	1,3	1,2	1,3	3,3	2,76	5,76	3,39	4,5	2,7	2,9	4,2
diciembre	1,47	1,34	0,92	3,3	2,42	6	4,5	4,33	2,68	2,94	4,38
Promedio	1,15	1,16	0,95	2,51	3,98	4,38	2,57	4,26	2,83	2,79	3,85

Vibraciones relativas en eje

MES-AÑO	RA1	RB1	RA2	RA3	RB3	RA4	RB4	RA5	RB5
enero	36	28	47,8	29,7	62,3	40,7	41,9	27	18,7
febrero	25,9	23,6	40,3	43,5	81,7	40,2	35,8	30,3	20,4
marzo	41	33	46,6	27	54	41,5	49,3	31	20
abril	31	29	46	25	51	40	42	30	20
mayo	48	34	61,2	28	54	38	47	30,4	20,2
junio	51	35	39	27	56	40	44	29	21
julio	38,7	32,9	93,7	28	62	39	43	31	20,6
agosto	36,9	44	2	171	167	58	73	35	23
septiembre	43	50	F/S	211	211,7	56	73	36	24
octubre	68	105	F/S	228	226	65	82	36	22
noviembre	53	98		197	193	61,4	75,6	39,5	21,7
diciembre	68	111	F/S	203	197,4	60,6	73	35,8	22,4
Promedio	45,84	51,96	47,88	101,52	118,81	48,37	56,63	32,58	21,17

Anexo 2

SEGÚN VALORES HISTÓRICOS		CRITERIO SEVERIDAD VIBRACIONES MAGNITUD VELOCIDAD (RMS)											
		BUENO			SATISFACTORIO			ADMISIBLE		INADMISIBLE		POSIBLE AVERÍA	
Estado Técnico		Niveles Normales			Nivel de Cambio Significativo			MPP en BC		Mto. Según Oport		Mto. Correctivo	
Vc (Razon de Crecimiento)	Bien	≤ 1	≤ 1	> 1	≤ 2,5	> 2,5	≤ 4	> 4	≤ 6,3	> 6,3	> 6,3	> 6,3	> 6,3
Máquinas Pequeñas (<15KW) (CLASE II)	0,71	≥ 0,71	≤ 0,71	> 0,71	≤ 1,8	> 1,8	≤ 2,8	> 2,8	≤ 4,5	> 4,5	> 4,5	> 4,5	> 4,5
Máquinas Medianas (CL. III) 300KW Soportes Especiales.	1,12	≤ 1,12	≤ 1,12	> 1,12	≤ 2,8	> 2,8	≤ 4,5	> 4,5	≤ 7,1	> 7,1	> 7,1	> 7,1	> 7,1
Máquinas Grandes (CL. III) Bases Rígidas (> 75 KW)	1,80	≤ 1,80	≤ 1,80	> 1,8	≤ 4,5	> 4,5	≤ 7,2	> 7,2	≤ 11,34	> 11,34	> 11,34	> 11,34	> 11,34
TURBINAS (CLASE IV).		BUENO			SATISFACTORIO			ADMISIBLE		INADMISIBLE		POSIBLE AVERÍA	
Máquinas Grandes	Bien	≤ 1	≤ 1	> 1	≤ 2,5	> 2,5	≤ 4	> 4	≤ 6,4	> 6,4	> 6,4	> 6,4	> 6,4
Alta Velocidad (> 75 KW)	2,75	≤ 2,75	≤ 2,75	> 2,75	≤ 6,9	> 6,875	≤ 11	> 11	≤ 17,33	> 17,33	> 17,33	> 17,33	> 17,33

Anexo3

SISTEMA DE CALCULO PARA DETERMINAR LAS TABLAS DE CRITERIOS DE SEVERIDAD DE LAS VIBRACIONES.

Criterio	Bien (Vb)	Estable	Sastisf.	Un Poco Inestable	Muy Inestable	Imposible Trabajar	Dar Mto a Corto Plazo	Dar Mto de Inmediato	PARAR Inmediato
Vcr	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	5	Vrc > 5
≤ 500	33	>33 ≤ 49,5	> 49,5 ≤ 66	> 66 ≤ 82,5	> 82,5 ≤ 99	> 99 ≤ 115,5	> 115,5 ≤ 132	> 132 ≤ 165	165
> 500 ≤ 750	30	>30 ≤ 45	> 45 ≤ 60	> 60 ≤ 75	> 75 ≤ 90	> 90 ≤ 105	> 105 ≤ 120	> 120 ≤ 150	150
> 750 ≤ 1000	28	>28 ≤ 42	> 42 ≤ 56	> 56 ≤ 70	> 70 ≤ 84	> 84 ≤ 98	> 98 ≤ 112	> 112 ≤ 140	140
> 1000 ≤ 1250	26	>26 ≤ 39	> 39 ≤ 52	> 52 ≤ 65	> 65 ≤ 78	> 78 ≤ 91	> 91 ≤ 104	> 104 ≤ 130	130
> 1250 ≤ 1500	24	>24 ≤ 36	> 36 ≤ 48	> 48 ≤ 60	> 60 ≤ 72	> 72 ≤ 84	> 84 ≤ 96	> 96 ≤ 120	120
> 1500 ≤ 1750	23	>23 ≤ 34,5	> 34,5 ≤ 46	> 46 ≤ 57,5	> 57,5 ≤ 69	> 69 ≤ 80,5	> 80,5 ≤ 92	> 92 ≤ 115	115
> 1750 ≤ 2250	22	>22 ≤ 33	> 33 ≤ 44	> 44 ≤ 55	> 55 ≤ 66	> 66 ≤ 77	> 77 ≤ 88	> 88 ≤ 110	110
> 2250 ≤ 2700	20	>20 ≤ 30	> 30 ≤ 40	> 40 ≤ 50	> 50 ≤ 60	> 60 ≤ 70	> 70 ≤ 80	> 80 ≤ 100	100
> 2700 ≤ 3000	18	>18 ≤ 27	> 27 ≤ 36	> 36 ≤ 45	> 45 ≤ 54	> 54 ≤ 63	> 63 ≤ 72	> 72 ≤ 90	90
> 3000 ≤ 3250	17	>17 ≤ 25,5	> 25,5 ≤ 34	> 34 ≤ 42,5	> 42,5 ≤ 51	> 51 ≤ 59,5	> 59,5 ≤ 68	> 68 ≤ 85	85
> 3250 ≤ 3750	15	>15 ≤ 22,5	> 22,5 ≤ 30	> 30 ≤ 37,5	> 37,5 ≤ 45	> 45 ≤ 52,5	> 52,5 ≤ 60	> 60 ≤ 75	75
> 3750 ≤ 4000	13	>13 ≤ 19,5	> 19,5 ≤ 26	> 26 ≤ 32,5	> 32,5 ≤ 39	> 39 ≤ 45,5	> 45,5 ≤ 52	> 52 ≤ 65	65
> 4000 ≤ 4500	12	>12 ≤ 18	> 18 ≤ 24	> 24 ≤ 30	> 30 ≤ 36	> 36 ≤ 42	> 42 ≤ 48	> 48 ≤ 60	60
> 4500 ≤ 5000	10	>10 ≤ 15	> 15 ≤ 20	> 20 ≤ 25	> 25 ≤ 30	> 30 ≤ 35	> 35 ≤ 40	> 40 ≤ 50	50
> 5000 ≤ 6000	6	>6 ≤ 9	> 9 ≤ 12	> 12 ≤ 15	> 15 ≤ 18	> 18 ≤ 21	> 21 ≤ 24	> 24 ≤ 30	30
		> ≤	> ≤	> ≤	> ≤	> ≤	> ≤	> ≤	

DESPLAZAMIENTO PICO-PICO

Donde:

RPM- Revoluciones por Minutos

Vcr- Valores de Cambio

Vb- Valor Bien (según Normas del Fabricante, Normas Estándar, o valores historicos este es el mas confiable).