



Universidad de Cienfuegos “Carlos Rafael Rodríguez”
MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR FACULTAD DE INGENIERIA
MECÁNICA

TRABAJO DE DIPLOMA

**TITULO: FACTIBILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICO PARA LA
INTRODUCCIÓN DEL DIAGNÓSTICO EN RODAMIENTOS
EN LA ETE CIENFUEGOS.**

Autor: MARIO ISRAEL PEREZ GUTIERREZ

Tutor: MSc. Ing. SILVINO CHAVIANO BERNAL

CIENFUEGOS, 2014

Agradecimientos

Agradezco a mi padre por ser el faro que me impulsó a comenzar y continuar mis estudios.

A mi esposa Lianet por estudiar conmigo seis años y graduarse junto a mi.

A mi hijo que fue mi motor impulsor

A mi suegra por su incondicionalidad

En especial a mi tutor Silvino Chaviano por perder horas de trabajo y el sueño conmigo en estos momentos finales.

A todas las personas que contribuyeron a materializar mi objetivo.

Dedicatoria

Dedico este trabajo a mi papá, a mi mamá donde quiera que esté, a mi esposa, a mi hijo, a mi suegra, a mi cuñado, por el apoyo que me brindaron durante toda la carrera, y en especial a mi padre porque (al fin su sueño se hizo realidad) cumpla la promesa de graduarme.

Resumen

El presente trabajo de diploma, titulado Factibilidad Técnico Económica para la introducción del Diagnóstico en Rodamientos en la ETE Cienfuegos. Enfocada en la gestión del mantenimiento teniendo en cuenta las modernas tecnologías, dirigida a aquellos métodos que proporcionan una evaluación de los sistemas dinámicos con chumaceras de rodamientos, en los equipos sin desmontajes previos. Se hace énfasis en el método de análisis de vibraciones que junto con el monitoreo de otros parámetros de estado específicos de cada máquina, constituyen la base del mantenimiento predictivo basado en la condición (MBC) y mantenimiento preventivo por diagnóstico (MPD) en equipos rotatorios, que a su vez combinado con los sistemas de mantenimiento preventivo planificado (MPP) y correctivo, constituyen una base mas sólida para un sistema de mantenimiento flexible y dinámico. Este trabajo, que se relaciona con el mantenimiento a equipos rotatorios, logra su objetivo fundamental, que está dirigidos a recoger de forma particular los métodos organizativos y los principales aspectos técnico- económico necesarios para resolver una de las deficiencias detectadas durante el diagnóstico realizado en el proceso de mantenimiento de la entidad. Sus resultados prácticos contribuyen de manera efectiva a la reducción de las averías que generan energía indisponible en planta.

Índice

Introducción	1
Capítulo I. La gestión del mantenimiento en la industria. Conceptos generales y terminologías asociadas a los rodamientos.	5
I: Conceptos generales y terminologías relacionadas con la actividad del mantenimiento y las reparaciones en sistemas o equipos que operan rodamientos.	5
1.1.1 Evolución histórica del mantenimiento.....	6
1.2. El Diagnóstico en el mantenimiento	10
1.2.1 Formas organizativas de sistemas de mantenimiento Predictivo aplicables al diagnóstico en rodamientos.....	10
1.3 Índices básicos para el diagnostico predictivo de rodamientos.	14
1.4 Análisis vibracional.	15
1.4.1 Concepto básico de vibraciones.....	15
1.5 Rodamientos tipos y características fundamentales.....	18
1.5.1 Partes del rodamiento.....	21
1.5.2 Clasificación de los rodamientos.....	22
1.5.3 Mantenimiento del rodamiento	23
1.5.4 Vibración del rodamiento.....	23
1.5.5 Temperatura del rodamiento	24
1.5.6 Objetivo de la lubricación	24
1.6 Otras técnicas y herramientas del diagnóstico aplicables al mantenimiento de rodamiento.....	26
Conclusiones parciales del Capítulo I	30
Capítulo II. Métodos y técnicas aplicadas para la introducción del mantenimiento por diagnóstico en rodamientos en la ETE Cienfuegos.	31
Caracterización del objeto de estudio (ETE Cienfuegos)	31
2.2 Principales Producciones y Significación Social.....	32
2.3 Situación actual y perspectivas de desarrollo	33
2.4. Métodos y técnicas aplicadas en la realización del trabajo.	33
2.4.1 Selección y categorización de equipos de planta.	33
2.5: Obtención de los límites de severidad de las vibraciones. Valores patrones.	51
Conclusiones parciales del Capítulo II.	54

Capítulo III. Resultados técnico económico obtenidos a partir de la aplicación del sistema de mantenimiento por diagnóstico en rodamientos.	55
3.1: Resultados Técnico-Económico del comportamiento del método en Ventilador de Tiro Forzado (VTF).....	55
3.2 Principio de funcionamiento del calentador de aire regenerativo y base de datos. Calentador de Aire Regenerativo. (CAR)	56
3.3 Principio de funcionamiento del Ventilador Detector de Llama (VEDLL) y Base de datos.....	58
3.4: Ejemplos practico de la aplicación de estas técnicas antes mencionadas, que han permitido la reducción de las averías en equipos con rodamientos.	59
3.3.1 En el ejemplo a continuación muestra una aplicación práctica determinada por la investigación de una falla ocurrida en el VTF 4A durante el año 2009.....	60
3.3.2 Ejemplos de aplicación de estas técnicas en defectos de Ventiladores Detectores de Llama unidad 3 y 4. Según resultados de las bases de dato.....	65
3.3.3 Ejemplos de aplicación de estas técnicas con miras predictivas, aplicado a los posibles defectos de Reductores de los CAR, por la gran cantidad de rodamientos que tienen y las variadas velocidades en los diferentes sistemas de engrane.	67
3.4 instrumentos necesarios para la introducción del mantenimiento predictivo en rodamientos.....	69
3.5 Sistema Organizativo para el Diagnóstico y Monitoreo de Estado aplicado durante la implantación del Sistema de Mantenimiento por diagnóstico en rodamientos.....	70
3.6. Resultados Técnicos de la aplicación del Sistema de Mantenimiento por Diagnóstico Según Estados a equipos Categoría B.....	71
3.6.1 Resultados de la Valoración técnica	71
3.6.2 Efecto Económico por aproximación.....	74
Conclusiones parciales del Capítulo III	75
Bibliografía.....	¡Error! Marcador no definido.
Anexos	82
Unidad Japonesa III	94

Introducción

La tarea de tomar decisiones constituye la actividad cotidiana que involucra la necesidad de evaluar opciones y elegir, de entre todas, aquella que mejor se adecue a los objetivos perseguidos.

Es indudable que aspectos tales como situaciones estratégicas, control del mantenimiento, políticas de recursos humanos, cobertura de salud y accidentes laborales, reorganizaciones, establecimiento de métodos de las nuevas formas del mantenimiento actual, factibilidad de exportación o importación o selección de tecnologías y la gestión del costo de mantenimiento son algunas de las aristas de una empresa u organización que cotidianamente atrapan la atención de directivos y decisiones.

El mantenimiento es una disciplina integradora que garantiza la disponibilidad, funcionalidad y conservación del equipamiento, siempre que se aplique correctamente, a un costo competitivo.

El desarrollo Industrial de Generación Eléctrica, en el territorio de Cienfuegos, cada día se vuelve más competitiva. Para alcanzar este objetivo, las mismas trabajan en el mejoramiento de su disponibilidad y de su confiabilidad como única forma de reducir los costos y aumentar su eficiencia, como una de las tareas prioritarias de toda gran industria moderna.

La presente investigación trata de hacer suya la idea anterior a través de la introducción de métodos que permita la introducción del mantenimiento por diagnóstico predictivo en aquellos agregados que funcionan con rodamientos, que de respuestas a la nueva estrategia, con fines de la reducción de averías imprevistas a partir de la predicción de los defectos en sistemas con chumaceras de rodamientos. Esto nos lleva a tratar lo siguiente:

Problema Investigación: La necesidad de evaluar el estado técnico de chumaceras de rodamientos en los equipos durante su explotación,

La investigación tiene como **Objetivo General:** Realizar un estudio teórico práctico que permita, implantar una metodología para la evaluación del estado técnico de los equipos con rodamientos de planta, así como la determinación de los parámetros de síntomas a monitorear predictivamente ante de las fallas, en chumaceras de rodamiento.

Derivándose como objetivos específicos:

1. Realizar una revisión bibliográfica sobre temas relacionados con las chumaceras de rodamiento y modalidades actuales del mantenimiento.
2. Diagnosticar el proceso de mantenimiento a rodamientos en la ETE Cienfuegos.
3. Diseñar y aplicar una metodología para evaluar parámetros de estado a controlar, que se relacionen con síntomas de fallas en los rodamientos en los equipos durante su explotación.

Justificación de la Investigación:

Con la investigación se le proporciona a la organización una metodología que le permite evaluar parámetros de estado en los equipos durante el mantenimiento, posterior a este, y durante la explotación, con la realización del trabajo se demuestra como los cambios en el sistema de mantenimiento permiten mejoras en el mantenimiento Preventivo Planificado (MPP), lográndose disminuir la tendencia a la aplicación del mantenimiento contra averías, a partir de la introducción de un seguimiento predictivo, más efectivo del estado de los equipos con chumaceras de rodamientos, al igual que la organización del mismo, quedando demostrado que la aplicación de la metodología nos aporta entre otros resultados:

1. Disminución de averías, aumentando de forma considerable la disponibilidad y la confiabilidad de la empresa.
2. Alargamiento en la vida útil de los rodamientos y su vez de los equipos.

3. Utilización más adecuada de los medios técnicos y humanos con que cuenta la empresa en la esfera del mantenimiento por diagnóstico.

Hipótesis de investigación

Realización de una metodología, que contribuya con la evaluación de parámetros de estado y al dictamen de las condiciones técnicas de los equipos con chumaceras de rodamiento, durante el mantenimiento y explotación, en la ETE Cienfuegos.

Actualidad

Las fábricas de hoy en día precisan de una organización del mantenimiento aún cuando tiene un costo asociado, de aquí la necesidad de entender la finalidad básica de la gestión de mantenimiento, que es estimular la optimización del uso de mano de obra, cantidad de materiales, minimizar tiempos de paro; estableciendo objetivos atractivos desde el punto de vista de un beneficio potencial y el costo de mantenimiento.

El trabajo que nos ocupa aborda una problemática de gran importancia y sensibilidad. Reviste singular actualidad toda vez que se plantea la utilización de una metodología para determinar los parámetros síntomas más adecuados durante el monitoreo de estado de rodamientos.

Resultados esperados

Un procedimiento integral para determinar los costos de mantenimiento en la Empresa Termoeléctrica “Carlos Manuel de Céspedes” de Cienfuegos, como herramienta eficaz para el control y la toma de decisiones.

Un aprovechamiento óptimo de los recursos materiales.

Una disminución de la energía indisponible, por averías en equipos rotodinámicos.

Una disminución de los costos de producción referidos a los gastos indirectos (Mano de obra y recursos materiales).

Capítulo I. La gestión del mantenimiento en la industria. Conceptos generales y terminologías asociadas a los rodamientos.

I: Conceptos generales y terminologías relacionadas con la actividad del mantenimiento y las reparaciones en sistemas o equipos que operan rodamientos.

Muchos son los autores como *(Corrales, 1993)* y *(Morrow, 1973)* que han hablado sobre la filosofía del mantenimiento, más no se han detenido a revisar el término en su contexto original y simplemente pasan a definir los tipos o metodologías del mantenimiento que son los que en su interior llevan la filosofía, esto principalmente se debe al afán que tiene el personal técnico para dar respuesta a problemas, en este caso en explicar como se deben enfrentar las dificultades asociadas al mantenimiento de los activos. Por lo que en esta investigación se hace necesario construir el pensamiento y la forma de actuación a partir de la disertación que sobre el mantenimiento es necesario realizar.

Disímiles son los autores que aportan sobre esta temática, tal es el caso de la dada por *(Corrales, 1993)*, quien lo determina como un procedimiento sistemático y estructurado para determinar los requerimientos de mantenimiento de los activos en su contexto de operación.

Se puede indicar el mantenimiento, como el conjunto de técnicos o tecnologías que aseguran la correcta utilización de edificios e instalaciones y el continuo funcionamiento de la maquinaria para conseguir a un costo competitivo la disponibilidad de los activos. Por otra parte se define como un servicio que agrupa una serie de actividades cuya ejecución permite alcanzar un mayor grado de confiabilidad en los equipos, máquinas, construcciones civiles e instalaciones.

Por lo que en la investigación se asume el concepto de mantenimiento aportado por Moubray dada la importancia del tratamiento que se hace del procedimiento sistemático y estructurado en la elaboración de los métodos metodología de fallas y averías en los rodamientos.

1.1.1 Evolución histórica del mantenimiento.

Históricamente el mantenimiento ha evolucionado a través del tiempo, Moubray (1997), explica en su texto que desde el punto de vista práctico del mantenimiento, se diferencian enfoques de mejores prácticas aplicadas cada una en épocas determinadas. Para una mejor comprensión de la evolución y desarrollo del mantenimiento desde sus inicios y hasta nuestros días, Moubray distingue tres generaciones a saber:

Primera generación:

Cubre el período hasta el final de la II Guerra Mundial, en ésta época las industrias tenían pocas máquinas, eran muy simples, fáciles de reparar y normalmente sobredimensionadas. Los volúmenes de producción eran bajos, por lo que los tiempos de parada no eran importantes. La prevención de fallas en los equipos no era de alta prioridad gerencial, y solo se aplicaba el mantenimiento reactivo o de reparación.

Segunda generación:

Nació como consecuencia de la guerra, se incorporaron maquinarias más complejas, y el tiempo improductivo comenzó a preocupar ya que se dejaban de percibir ganancias por efectos de demanda, de allí la idea de que los fallos de la maquinaria se podían y debían prevenir, idea que tomaría el nombre de mantenimiento preventivo. Además se comenzaron a implementar sistemas de control y planificación del mantenimiento, o sea las revisiones a intervalos fijos.

Tercera generación:

Se inicia a mediados de la década de los setenta donde los cambios, a raíz del avance tecnológico y de nuevas investigaciones, se aceleran. Aumenta la mecanización y la automatización en la industria, se opera con volúmenes de producción más altos, se le da importancia a los tiempos de parada debido a los costos por pérdidas de producción, alcanzan mayor complejidad las maquinarias y aumenta nuestra dependencia de ellas, se exigen productos y servicios de calidad,

considerando aspectos de seguridad y medio ambiente y se consolida el desarrollo de mantenimiento preventivo.

1.1.2 Tipos de mantenimientos

Existen cuatro tipos reconocidos de operaciones de mantenimiento, los cuales están en función del momento, del tiempo en que se realizan, el objetivo particular para el cual son puestos en marcha, y en función a los recursos utilizados (Corrales, 1993).

Dentro de esto se puede determinar que el **Mantenimiento Reactivo (contra averías)** constituye un ejemplo de ello y se identifica como todos los servicios ejecutados a los equipos con fallos o defectos, se puede definir como la actividad humana desarrollada sobre los recursos cuando como consecuencia de algunas fallas han dejado de prestar los servicios esperados.

La utilización de esta tipología trae consigo un grupo de consecuencias dentro de las cuales se pueden encontrar:

- Paradas no previstas en el proceso productivo, disminuyendo las horas operativas.
- Afecta las cadenas productivas, es decir, que los ciclos productivos posteriores se verán parados a la espera de la corrección de la etapa anterior.
- Presenta costos por reparación y repuestos no presupuestados, por lo que se dará el caso que por falta de recursos económicos no se podrán comprar los repuestos en el momento deseado
- La planificación del tiempo que estará el sistema fuera de operación no es predecible.

Otro tipo de mantenimiento al cual debe prestarse atención es al **Preventivo Planificado (MPP)** el cual se identifica con los servicios de inspección sistemática, ajustes, conservación y eliminación de defectos que contribuyan a evitar averías. El MPP puede ser según recomendaciones del fabricante, medición de parámetros de síntomas y basado en la fiabilidad.

También puede verse el **Mantenimiento Predictivo** que se identifica con los servicios de inspección sistemáticos que se realizan, procurando prever, predecir qué es lo que puede ocurrir a un recurso y/o a su servicio, con vistas a entonces actuar preventivamente y evitar las acciones correctivas. Se trata de conseguir adelantarse a la falla o al momento en que el equipo o elemento deja de trabajar en sus condiciones óptimas.

Tiene como objetivo disminuir las paradas por mantenimientos preventivos, y de esta manera minimizar los costos por mantenimiento y por no producción. La implementación de este tipo de métodos requiere de inversión en equipos, en instrumentos, y en contratación de personal calificado.

Finalmente está el **Mantenimiento Productivo Total (T.P.M.)** identificado como el sistema de organización donde la responsabilidad no recae sólo en el departamento de mantenimiento sino en toda la estructura de la empresa "El buen funcionamiento de las máquinas o instalaciones depende y es responsabilidad de todos".

El TPM es el sistema Japonés de mantenimiento industrial, la letra M representa acciones de Management y Mantenimiento. Es un enfoque de realizar actividades de dirección y transformación de empresa. La letra P está vinculada a la palabra "Productivo" o "Productividad" de equipos pero se ha considerado que se puede asociar a un término con una visión más amplia como "Perfeccionamiento". La letra T de la palabra "Total" se interpreta como "Todas las actividades que realizan todas las personas que trabajan en la empresa".

1.1.3 Fallos y averías de los sistemas

Antes de comenzar el análisis de averías se hizo necesario delimitar el alcance del mismo. Esto se consigue definiendo los límites del sistema identificado como un conjunto de elementos discretos, denominados generalmente componentes, interconectados o en interacción, cuya misión es realizar una o varias funciones, en unas condiciones predeterminadas. El análisis de averías debe contemplar una

fase en que se defina el sistema, sus funciones y las condiciones de funcionamiento.

Por lo que el fallo de un sistema se reconoce como la pérdida de aptitud para cumplir una determinada función y en este sentido se pueden clasificar los fallos atendiendo a distintos criterios:

- a) Según se manifiesta el fallo:- Evidente: Progresivo, Súbito y Oculto
- b) Según su magnitud: Parcial y Total.
- c) Según su manifestación y magnitud: Cataléptico: súbito y total. Por degradación: progresivo y parcial
- d) Según el momento de aparición: Infantil o precoz, Aleatorio o de tasa de fallos, constante y de desgaste o envejecimiento.
- e) Según sus efectos: Menor, Significativo, Crítico y Catastrófico.
- f) Según sus causas: Primario: la causa directa está en el propio sistema. Secundario: la causa directa está en otro sistema. Múltiple: fallo de un sistema tras el fallo de su dispositivo de protección.

El modo de fallo es el efecto observable por el que se constata el fallo del sistema. A cada fallo se le asocian diversos modos de fallo y cada uno se genera como consecuencia de una o varias causas de fallo; de manera que un modo de fallo representa el efecto por el que se manifiesta la causa de fallo. La avería es el estado del sistema tras la aparición del fallo.

El mantenimiento está orientado a reducir al mínimo la indisponibilidad y fiabilidad de los activos (reducción de los fallos). Para calificar el mantenimiento de **Eficiente** es preciso además reducir los costos.

De hecho 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 donde más del 50 % del ahorro que se puede lograr mediante la utilización de las técnicas de diagnóstico, todo lo cual justifica el análisis integral de la relación entre el sistema de mantenimiento utilizado y los métodos y técnicas de diagnóstico.

1.2. 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 ni su funcionamiento normal, ni el proceso productivo. El método de análisis de parámetros, 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.

1.2.1 Formas organizativas de sistemas de mantenimiento Predictivo aplicables al diagnóstico en rodamientos.

Como la actualidad, el vocablo diagnóstico, ha ganado popularidad en nuestro país, en los círculos relacionados con la actividad de centrales eléctricas y plantas térmicas en general, resulta oportuno y necesario, aclarar determinados aspectos propios de esta técnica para evitar así interpretaciones facilistas o erróneas en cuanto a sus posibilidades, exigencias y formas de aplicación.

Por lo que para realizar un adecuado diagnóstico de rodamiento es necesario concretar una serie de metas a seguir durante su aplicación, donde se cumplen habilidades encaminadas a la determinación, concreción y evaluación del mantenimiento predictivo. A continuación se evidencian las tres:

- La determinación certera de las causas de una falla y las medidas a aplicar para evitar su reproducción o limitar su incidencia.
- La concreción de los volúmenes de trabajo de mantenimiento verdaderamente necesarios para garantizar máxima disponibilidad del equipo con óptima eficiencia y confiabilidad, estableciendo el momento más adecuado para ejecución.
- Evaluación de la vida útil remanente de los diferentes agregados.

Constituyen objetivos del diagnóstico, con la finalidad de determinar cuál es imprescindible.

- La creación de un sistema informativo amplio de toma de datos, clasificación y procedimiento estadístico de los mismos.
- La caracterización sistemática de todo un universo de fallas.
- El control periódico del estado de los materiales.

De aquí entonces que se establezcan dos ramas o vertientes del diagnóstico que responden a objetivos independientes, que se relacionan y completan mutuamente:

1. Diagnóstico de fallas o averías.
2. Diagnóstico predictivo o de comportamiento.

En el primer caso (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 qué se produjo la avería y qué hacer para que no ocurra de nuevo y por tanto no se vea 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. Por lo que se identifican como 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.

Para ello requiere de la integración de un conjunto de elementos como son:

- 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.

La otra vertiente es el Diagnóstico predictivo o de comportamiento donde se identifican que las exigencias a la actividad de mantenimiento de los equipos de plantas en general, se determinan por las condiciones económicas imperantes, caracterizada en el mundo actual por la escases creciente de los portadores energéticos tradicionalmente, el alto costo de las tecnologías, los equipos, las piezas de repuesto y los materiales, así como por la necesidad de incremento constante de la producción industrial.

Las premisas anteriores, imponen la aplicación al mantenimiento de técnicas que garanticen de una mayor disponibilidad, eficiencia y confiabilidad en los equipos.

Del análisis al muy difundido sistema de mantenimiento preventivo, con sus volúmenes de trabajo tipificados y establecidos para ser ejecutado en intervalos de operación predeterminados, se concluye:

- En la medida en que se incrementan los volúmenes de trabajo a ejecutar, aumentan, el tiempo de permanencia fuera de servicio, el consumo material, los recursos humanos especializados que se requieren y en general los costos.
- El incremento excesivo de los volúmenes de trabajo de mantenimiento, no garantiza sin embargo la imposibilidad de fallas imprevistas, en cualquier de los agregados reparados.
- Mayores volúmenes de trabajo, aumenta también las posibilidades de falla una vez restituido el equipo al servicio debido a los riesgos implícitos en los grades desarmes.

- Tanto los volúmenes de trabajo tipificados como el momento de su ejecución son determinados por los fabricantes a partir de experiencias de laboratorio o de campo que se procesan para calcular valores medios, cuya aproximación al comportamiento más probable depende del tamaño y las características de la muestra utilizada y que resultan inevitablemente antieconómicos y hasta riesgo para aquellos equipos que durante su vida útil se aparten de la media establecida.

Un sistema de mantenimiento técnica y económicamente y eficaz, deberá basarse en elementos objetivos que indiquen con certeza en que parte del equipo y en qué momento trabajar, logrando así la mínima interrupción del servicio, en el entorno más conveniente y con preparación requerida, que representara los recursos materiales y humanos verdaderamente necesarios.

Tal sistema deberá ser además lo suficiente flexible como facilitar su aplicación casuística obviando de esta forma generalizaciones que nieguen la individualidad de comportamiento de los equipos.

La incorporación de las técnicas de diagnóstico predictivo a la actividad de mantenimiento industrial, permite alcanzar los objetivos expuestos, sobre la base de que todo equipo o agregado antes de fallar, manifiesta síntomas de de ser detectados posibilitan la preparación adecuada para prevenir una situación de avería.

Las posibilidades reales de detectar todos y cada uno de los síntomas y además con anticipación suficiente para estudiar su evolución adoptando las medidas necesarias según el caso, constituyen las principales limitaciones a la aplicación técnica.

El diagnóstico predictivo o de comportamiento se orienta concretamente hacia la:

- Determinación de los volúmenes de trabajo de mantenimiento verdaderamente necesarios.

- Determinación del momento técnico y económicamente más adecuado para la ejecución de los trabajos de mantenimientos.
- Evaluación de la vida útil remanente de los distintos agregados.

Para esto alcanzar esto con la mayor calidad requerida es necesario que se integren los siguientes elementos:

- Sistema de medición periódica de parámetros operacionales seleccionados y de ejecución de pruebas de comportamiento.
- Sistema de control periódico de los materiales de puntos seleccionados.
- Sistema de procesamiento estadístico de los resultados de pruebas y mediciones.
- Método de evaluación de vida útil remanente.
- El análisis sistemático de los agregados fundamentales del equipo con vista a la determinación predictiva del momento más probable de operación antieconómica o límite, y de los volúmenes de trabajo verdaderamente necesarios para restituir valores normados de eficiencia y confiabilidad.

1.3 Índices básicos para el diagnostico predictivo de rodamientos.

Un control periódico y sistemático de los estados de los sistemas de las chumaceras de rodamiento, unido al procesamiento dinámico y al análisis consecuente de sus variaciones, posibilita no solo diagnosticar toda una diversidad de anomalías desde un estado incipiente, sino también extrapolar en el tiempo su probable comportamiento, predeterminado con anticipación suficiente para lograr la preparación necesaria, el momento técnico económicamente más conveniente para efectuar los trabajos encaminados a restituir los parámetros de eficiencia y confiabilidad.

Cuando de rodamientos se trata, el ruido, la temperatura y las vibraciones constituyen el indicativo básico y su progresión puede detectarse mediante el control de los cambios de estos parámetros de estado, el momento más adecuado para efectuar los mantenimientos que le correspondan.

Aunque la aplicación de la técnica objeto de este trabajo solo exige una adecuada organización e instrumentación, equipamiento de medición y análisis convencional; el desarrollo de esta esfera introduce constantemente nuevos métodos como la termografía, el análisis espectral de las vibraciones, las mediciones del BCU, entre otros, que constituyen un complemento sofisticado durante la determinación predictiva de las fallas en rodamientos.

1.4 Análisis vibracional.

1.4.1 Concepto básico de vibraciones.

Vibraciones, 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, $s = A \sin(\omega t + \phi)$

Es necesario en la investigación resaltar algunas de las terminologías asociadas a las vibraciones, donde desde el análisis de los estudios de (Marín, 1997) se determina como **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.

Se entiende por **vibración vertical** al 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.

Por **vibración Horizontal**, se entiende al 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 transversal se simboliza con la letra H.

De igual forma aporta la definición de **vibración radial**, como aquella que 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.

Está además la **vibración axial**, integrada por los componentes 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.

El **plano de la medición**, no es más 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.

Otra conceptualización necesaria para el análisis de las variaciones lo es la **Amplitud**, reconocida como 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.

En la Norma ISO 2041-1974 se definen:

- **Frecuencia**, como la medida de la cantidad de ciclos completos que acontecen en un intervalo de tiempo específico

- **Desplazamiento**, 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 $\mu m = 0.001 \text{ mm}$.
- **Velocidad**, como 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 defasaje de $T/4$ Su unidad de medida es en mm/s .
- **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 .
- **Aceleración**, 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
- **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 .

- **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.
- **Vibraciones de Frecuencia Rotacional (1N)**, son aquellas cuya frecuencia corresponde, en ciclos por segundos, a la velocidad de rotación instantánea del equipo.
- **Vibraciones de baja frecuencia**, son las que la frecuencia es menor que la frecuencia nominal o de operación.
- **Vibraciones de alta frecuencia**, son aquellas cuya frecuencia es mayor que la frecuencia nominal o de operación.

De forma general se han expuesto las conceptualizaciones asociadas a la terminología de variación, necesarias todas para la propuesta metodológica a tener en cuenta en el diagnóstico de fallas y averías en los rodamientos.

1.5 Rodamientos tipos y características fundamentales

Los rodamientos son un tipo de soporte de ejes o cojinetes que emplean pequeños elementos rodantes para disminuir la fricción entre las superficies giratorias, dado que la resistencia de fricción por rodadura es menor que la resistencia de fricción por deslizamiento.

Los rodamientos son componentes estandarizados de maquinarias que transmiten fuerzas, momentos y movimientos de rotación. Debido a la amplia gama de tipos, diseños y tamaños existentes en la industria del rodamiento se dispone de un rodamiento adecuado a casi cualquier aplicación existente.

El principio básico de funcionamiento de un rodamiento, radica en la reducción de la magnitud de la fuerza de rozamiento con la superficie base, introduciendo elementos rodantes pequeños, en consecuencia la fuerza de fricción opuesta al movimiento es mucho menor. Al introducir elementos rodantes se hace posible facilitar el movimiento entre los elementos en contacto por las características de rodadura propias de estos. Muchas veces, debido a esta circunstancia, estos

elementos son llamados “cojinetes antifricción” pero en realidad la fricción se halla siempre presente aunque en menor magnitud.

Atendiendo a la geometría de los elementos rodantes se pueden identificar los tipos de rodamientos, agrupados en los siguientes grupos:

- Rodamiento de bolas
- Rodamiento de rodillos
 - o Cilíndrico
 - o Cónico
 - o Esférico
 - o De agujas

Los rodamientos de bolas son capaces de desarrollar velocidades más altas y los rodamientos de rodillos pueden soportar cargas más altas. De acuerdo al tipo de carga que deben soportar los rodamientos se dividen en:

- Rodamientos radiales
- Rodamientos axiales

En la Figura 1. Se muestran algunos casos de rodamientos de bolas. Los rodamientos de bolas de dos hileras poseen, razonablemente mayor capacidad de carga. Para aumentar la capacidad de carga radial se suelen utilizar rodamientos con abertura de entrada para bolas o los de contacto angular que permiten mayor número de bolas en contacto por hilera. Sin embargo este incremento de la capacidad de carga radial se produce a un costo de reducir la capacidad de carga axial. Para permitir desalineaciones considerables se utilizan rodamientos autoalineantes.

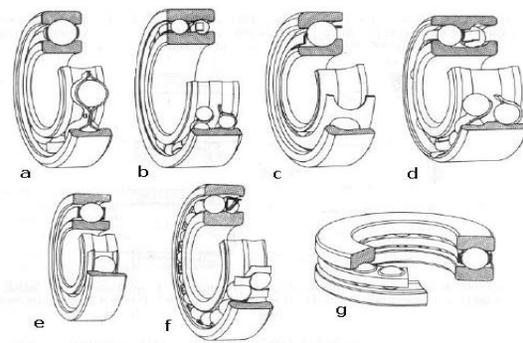


Figura 1. Rodamientos de bolas. (a) Rígido de una sola hilera (b) rígido de dos hileras (c) de contacto angular (d) de contacto angular de dos hileras (e) desmontable (f) oscilante (g) axial de simple efecto.

En la Figura 2. Se muestran algunos casos de rodamientos de rodillos. Los rodamientos de rodillos cónicos permiten soportar cargas axiales, aunque en una sola dirección, dado que en la otra se desmontan. Los rodamientos de agujas son los que tienen mayor capacidad de carga, mientras que los rodamientos de tambores esféricos oscilaciones angulares de los ejes que aportan. En la figura 3. a continuación se muestra un caso de rodamiento de aguja.

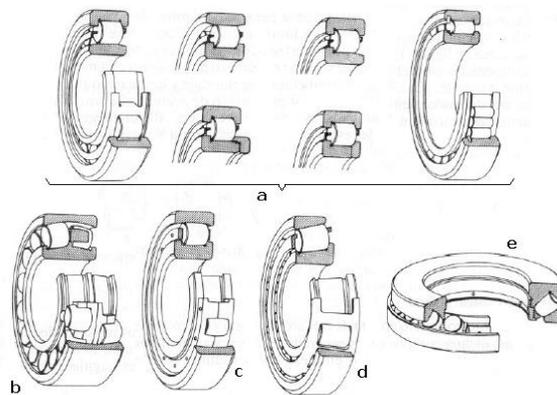


Figura 2. Rodamientos de rodillos. (a) de una sola hilera bajo diversas formas constructivas (b) de dos hileras oscilante (c) oscilante de una hilera (d) cónico (e) axial oscilante.

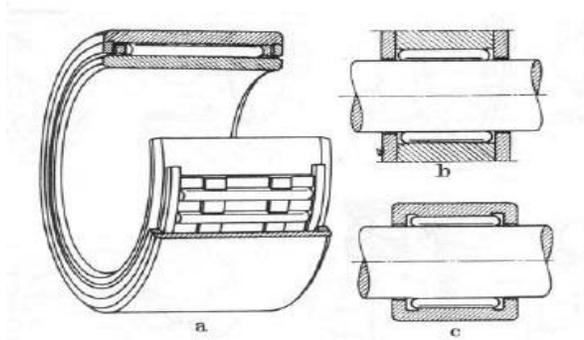


Figura 3. Rodamientos de rodillos

En el anexo 1. Se presentan los tipos fundamentales de rodamiento.

1.5.1 Partes del rodamiento.

En términos generales todos los rodamientos de contacto rodante están formados por las partes constructivas que se muestran en la figura 4, aún así existen excepciones. Algunos tipos de rodamientos no poseen sellos laterales, o por el contrario los tienen solo en una cara, muchos otros no tienen la jaula o rejilla y están completamente llenos de elementos rodantes. Algunos tipos de rodamientos no tienen anillo interior y ruedan directamente sobre la superficie del eje.

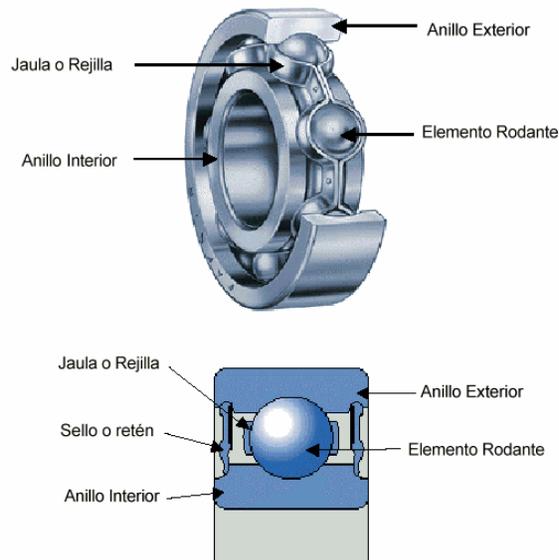


Figura 4. Descripción de un rodamiento típico.

La mayoría de los rodamientos consisten en dos aros, elementos de rodadura y una jaula, y se clasifican en rodamientos radiales y rodamientos axiales dependiendo de la dirección de la carga principal.

Aro de rodadura. La superficie sobre la que ruedan los elementos rodantes se llama aro de rodadura. Generalmente el aro interior se fija en el eje y el aro exterior en el alojamiento.

Elementos rodantes. Los elementos rodantes se clasifican en dos tipos, bolas y rodillos. Los rodillos pueden ser de cuatro tipos, cilíndricos, de agujas, cónicos y esféricos.

En el rodamiento de bolas el contacto de las bolas con el aro de rodadura del aro interior y exterior es teóricamente puntual, mientras que el contacto de los rodamientos de rodillos con los aros de rodadura es teóricamente lineal. Para una carga dada, en el caso de rodillos, la presión de contacto entre cuerpos rodantes y pista se reparte a lo largo de una línea. En el caso de bolas, se concentra en un solo punto. Por ello, para las mismas dimensiones, los rodamientos de rodillos soportan cargas más elevadas y velocidades límite menores.

Jaula. La función de la jaula es separar los cuerpos rodantes para que conserven su equidistancia. En el caso de rodamientos de rodillos cónicos, cilíndricos, a rótula, hacen solidarios los cuerpos rodantes con uno de los anillos.

1.5.2 Clasificación de los rodamientos

Los rodamientos se dividen en dos grupos principales, **rodamientos de bolas**: estos se clasifican de acuerdo con la forma del anillo, (rígidos de bolas y de magneto) y **rodamientos de rodillos** los cuales se clasifican de acuerdo al tipo de rodillo, (cilíndrico, de agujas, cónico y esférico). Otros métodos de clasificación pueden hacerse teniendo en cuenta los números de filas de rodamientos y valorando si son o no separables.

En cualquier caso, también existen otros tipos de rodamientos, diseñados según requerimientos del cliente, o fabricados en materiales especiales, como cerámica, resinas, aceros inoxidables, o sometidos a tratamientos especiales.

1.5.3 Mantenimiento del rodamiento

Periódicamente recomendamos inspeccionar los rodamientos y mantener sus condiciones en orden para maximizar su vida. Por lo que a continuación se listan un dos (2) recomendaciones para esto:

- (1) Inspección en condiciones de operación:** Para determinar el periodo de sustitución de los rodamientos e intervalos de para relubricación, investigar las propiedades del lubricante y considerar factores como temperatura de operación, vibración y ruido de los rodamientos.
- (2) Inspección del rodamiento:** Uno debe asegurarse de investigar el rodamiento durante los periodos de inspección de la máquina y sustitución de las partes. Verifique las condiciones de la pista, determine si hay daños, confirme si se puede “reutilizar” el rodamiento o si se debe sustituirlo.

Inspecciones y acciones correctivas: Ruido del rodamiento, vibración, temperatura y estado del lubricante son algunos de los puntos que debe considerarse durante la operación.

Ruido del rodamiento: Durante la operación, se pueden utilizar instrumentos de detección de ruido (el estetoscopio, NSK Bearing Monitor, etc.) para determinar las características del ruido.

1.5.4 Vibración del rodamiento

Se pueden analizar irregularidades en los rodamientos a través de la medida de vibraciones de una máquina en operación. Se utiliza el analizador de espectro de frecuencia para medir la magnitud de la vibración y la distribución de las frecuencias. Los resultados de las pruebas determinan las causas de la irregularidad. Los valores encontrados varían de acuerdo con las condiciones de

operación de los rodamientos y del punto dónde se mide la vibración. Así, el método necesita de procedimientos estándar para cada máquina.

1.5.5 Temperatura del rodamiento

Normalmente la temperatura del rodamiento puede ser estimada por la temperatura de la superficie externa del alojamiento, pero es aconsejable que se obtenga esta medida directamente en la superficie externa del anillo externo mediante un sensor enviado a través del agujero de lubricación.

La temperatura del rodamiento aumenta gradualmente después del inicio hasta alcanzar la temperatura normal de operación, de una o dos horas. La temperatura de operación del rodamiento depende de la carga, de la velocidad de rotación y de las propiedades de transferencia de calor de la máquina. Lubricación insuficiente o la instalación impropia pueden causar un aumento de temperatura rápido. En este caso, apague la máquina y utilice la acción correctiva apropiada.

1.5.6 Objetivo de la lubricación

Los objetivos de la lubricación son la reducción de la fricción y del deterioro interno que puede causar falla prematura. La lubricación correcta proporciona los siguientes beneficios:

- (1) reducción de la fricción y desgaste:** El contacto metálico entre los anillos, cuerpos rodantes y jaula, que son los componentes básicos, está protegido por una película de aceite que reduce la fricción y el desgaste de las áreas de contacto.
- (2) Alargamiento de la vida de fatiga:** La vida de fatiga de los rodamientos depende de la viscosidad y espesor de la película entre las superficies de contacto. Un gran espesor de la película alarga la vida de fatiga, pero la vida se reduce si la viscosidad del aceite es muy baja resultando en un espesor insuficiente de la película.
- (3) Dispersión de calor de fricción y enfriamiento:** El método de lubricación, así como el de circulación de aceite evita el deterioro del aceite lubricante y previene el calentamiento del rodamiento, enfriando y

disipando a través del aceite el calor originado por la fricción o el calor de origen externo.

- (4) **Sellado y protección contra oxidación:** La lubricación adecuada puede también prevenir la entrada de materiales ajenos y proteger contra la oxidación y corrosión.

1.5.6.1 Métodos de la lubricación

Los métodos de lubricación de rodamientos están divididos en dos categorías: La lubricación con grasa y lubricación con aceite. Se debe elegir el método de lubricación según las condiciones de aplicación y del propósito de la aplicación para alcanzar el mejor desempeño del rodamiento. La tabla 1 muestra una comparación entre grasa y aceite.

Tabla 1. Comparación entre la grasa y aceite

Tópico	Lubricación con grasa	Lubricación con aceite
Configuración del alojamiento y sistema de sellado	Simplificada.	Se torna un poco mas compleja y son necesarios cuidado en el mantenimiento.
Velocidad de rotación	El límite permisible es de un 65-85% de la lubricación con aceite.	También aplicable para las altas velocidades.
Trabajo de enfriamiento Efecto de enfriamiento	No hay.	Permite la retirada del calor con eficiencia (como en el método de circulación de aceite)
Fluidez	Inferior.	Muy buena
Sustitución del lubricante	Un poco compleja.	Relativamente fácil.
Filtraje de impurezas	Difícil	Fácil
Suciedad por escape	Reducido	Inadecuado para los locales donde las suciedades son desagradables.

A continuación se expone los elementos con los que se identifican los distintos métodos aplicación de lubricación.

(1) Lubricación con grasa: La grasa es un lubricante compuesto por el aceite, espesante y adictivos. Es necesario seleccionar una grasa compatible con el desempeño de las condiciones de aplicación del rodamiento. Hay grandes diferencias en desempeño entre dos grasas de fabricantes diferentes.

(2) Lubricación con aceite: Hay muchos métodos de lubricación con aceite: el baño de aceite, goteo, salpico, circulación, chorro de aceite, niebla de aceite y aire. La lubricación con aceite es especialmente efectiva para los casos en los que es necesario la disipación de calor para el exterior. Por lo que resulta de gran importancia seleccionar el aceite lubricante con viscosidad necesaria con la temperatura de operación del rodamiento. Normalmente se utiliza aceite con viscosidad baja para las aplicaciones en alta velocidad, mientras se utiliza un aceite con viscosidad alta para las aplicaciones con carga alta. Para las condiciones normales.

1.6 Otras técnicas y herramientas del diagnóstico aplicables al mantenimiento de rodamiento.

Para el análisis de tendencia existen varios tipos de gráficos, dentro de ellos están los gráficos de control, son diagramas lineales límites establecidos. Generalmente se usan como elementos de autocontrol, resultando muy útiles a los diagramas causas-efecto, cuando se logra aplicar a cada fases del proceso y detectar en cuales fases se producen las alteraciones.

El uso de estos gráficos supone las siguientes ventajas:

- (1)** Indica como cambia a través del tiempo la influencia de determinado factor.
- (2)** Permite el análisis del proceso, utilizando datos obtenidos durante cierto período de tiempo, mostrando con ello si el proceso está bajo control, además de definir los límites capacidad del sistema a partir de comparaciones.

Tipos de gráficos de control empleados.

- Gráfico de tendencia central.
- Gráficos de valores individuales.
- Gráficos de defectos por unidades.
- Gráficos de defectos por subgrupos racionales.

Los **gráficos de valores individuales**, se utilizan cuando no es posible o conveniente, hacer subgrupos racionales, debido a las razones siguientes:

- Cuando solo se puede obtener una información, de un proceso dado en cada inspección.
- Cuando la naturaleza del proceso es uniforme.
- Cuando lleva mucho tiempo o recursos tomar varias observaciones.

El Análisis causa efecto.

El diagrama Causa –Efecto (*J., 2001*), es la técnica gráfica para definir un efecto y hallar las causas que lo provoca. El mismo consiste en una estructura similar al esqueleto de un pescado, donde la cabeza es el problema que se quiere analizar. En las espinas se van anotando, ya clasificadas las causas probables de estos problemas. Las que se agrupan por semejanzas, importancia, o cualquier otra desviación.

En término general el Análisis Causa- Efecto (*Mendoza, 2001*) puede definirse como una metodología destinada a resolver de forma definitiva la ocurrencia de una falla o a poder programar de forma planificada su corrección cuando esta se presenta, es decir, mitigar la consecuencia de la falla. Esta metodología permite buscar la razón por la cual un sistema, instalación, equipo, componente o elemento, no funciona satisfactoriamente.

El macro proceso de análisis debe garantizar que se siga la secuencia de pasos que se indican a continuación:

1. Definición del problema.
2. Efectuar análisis del problema.
3. Identificar soluciones efectivas.
4. implementar soluciones.

Principales Definiciones relacionadas con el diagrama Causa-Efecto. Evento:

Suceso o situación no deseable que ocurre al desarrollar una actividad.

Causa Raíz: La (s) causa (s) fundamental (es) que, si es (son) corregida (s), prevendrá (n) la recurrencia de un evento o condición adversa. La mayoría de los eventos tienen múltiples causas que se combinan entre sí para producir un evento.

Análisis Causa Raíz: Es un método utilizado para identificar la (s) causa (s) raíz (ces) de problemas o eventos y las acciones correctivas asociadas.

Factor Causal: Una condición, acción o situación que propicia la aparición o desarrollo de un evento.

Factor contribuyente ó aparente: Causa que por sí misma no propicia el evento, pero es suficientemente importante como para reconocer que requiere una acción correctiva necesaria para mejorar la calidad del proceso.

El síntoma, es un fenómeno observable que surge de, y acompaña a, un defecto.

La causa es una razón probable de la existencia de defectos.

El remedio o corrección, es un cambio que puede eliminar o neutralizar con éxito una causa de defectos.

Causas de Fallo, Razones probables de la existencia del síntoma.

Efectos de fallo, Consecuencias del fallo sobre el sistema.

El registro es el documento, que presenta evidencias objetivas de las actividades realizadas o de los resultados obtenidos.

Conclusiones parciales del Capítulo I

En este Capítulo se ha desarrollado una breve introducción de los conceptos generales y terminologías relacionadas con la gestión del mantenimiento, diagnóstico, tipos de rodamientos empleados en las instalaciones energéticas y las reparaciones, que nos permiten hacer más admisible la comprensión del procedimiento propuesto en este trabajo debiéndose destacar entre otros:

- Los conceptos de mantenimiento que están relacionados estrechamente con los criterios de tipos de mantenimiento objetivo central de la central termoeléctrica.
- Los Gráficos de Control que permiten valorar el comportamiento de una variable, en función de ciertos límites establecidos, además resultan de gran información durante la aplicación de los diagramas Causa-Efecto.
- El concepto de fallo, que relaciona la capacidad operativa de trabajo del equipo con respecto a las valoraciones de sus posibles estados para su explotación sin defectos.
- El diagrama Causa – Efecto, que como técnica gráfica viabiliza la realización de análisis Causa – Raíz de los posibles defectos que acompañan las variaciones de los parámetros síntomas, que aparecen como efectos de de posibles fallas en los sistemas.
- Los conceptos de vibraciones y análisis espectral, como técnica aplicada en la actualidad en la ETE Cienfuegos, que nos permite ubicar en los diagnósticos la situación del mantenimiento en la empresa.

Capítulo II. Métodos y técnicas aplicadas para la introducción del mantenimiento por diagnóstico en rodamientos en la ETE Cienfuegos.

Caracterización del objeto de estudio (ETE Cienfuegos)

La central termoeléctrica se localiza al oeste de Cienfuegos, en la bahía en la ensenada del inglés.

La primera unidad fue la Dionisio San Román o también llamada O´Burke que fue inaugurada el 8 de Agosto de 1949 en tierra de una finca rústica llamada Nuestra Señora de Regla perteneciente a Nicolás Castaño y Manuel de la Torre. Todo esto pertenecía a la jurisdicción de Caonao (*Acta Consistorial 143, Archivo Histórico de Cienfuegos*).

Era subsidiaria de la planta que radicaba en Prado y Dórticos. Ambas plantas eran las bases energéticas del conjunto central.

En el año 1957 se produce un acto en la planta Dionisio San Román con el objetivo de bendecir uno de sus bloques y los trabajadores deciden irse para la producción ya que dicho acto iba a ser llevado a cabo por un capitalista asociado al sistema energético. Después del triunfo de la Revolución comienza la ampliación del Sistema Energético Nacional.

El 6 de Julio de 1960 nuestro Comandante en Jefe dio a conocer en la OCLAE la nacionalización de la Empresa Eléctrica. El 5 de Septiembre de 1961 se le da a la antigua planta de vapor el nombre de Dionisio San Román.

La empresa consta en la actualidad con dos tecnologías de Fabricación Japonesas, estas son: Dos Bloques de Fabricación Hitachi, montadas en 1987 y 1989, con una potencia de 158 Mw. Toda vez desintegradas las unidades Americanas y Checas por alto consumo específico de 1 KW y viejas tecnologías.

La Central Termoeléctrica de Cienfuegos tiene a partir de estas potencialidades la misión de forma parte del Sistema Eléctrico, dedicada básicamente a generar y suministrar energía eléctrica para satisfacer los requerimientos y necesidades

crecientes de nuestros clientes, con un alto nivel de profesionalismo, garantizando el necesario equilibrio con el entorno y el medio ambiente.

Por lo que trabaja para colocarse como entidad de referencia dentro del sistema UNE-MINBAS, siendo la central Termoeléctrica más rentable y eficaz en el ámbito nacional con sólidos valores y una alta profesionalidad y profundo sentido de pertenencia caracterizándolos además por una elevada optimización y desarrollo de los recursos humanos, facilitando y priorizando la protección al Medio Ambiente.

2.2 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 producción continua y los indicadores de consumo bajos que presenta la entidad garantizan que el consumo específico de la Unión Eléctrica de Cuba haya cerrado este año en 275 g/Kwh. Además la ETE Cienfuegos regula la frecuencia del sistema electro energético nacional.

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, se utiliza como unidad docente de la Facultad de Ingeniería 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.

2.3 Situación actual y perspectivas de desarrollo

En la actualidad la empresa muestra resultados que evidencian una real recuperación técnica-económica, después que en el quinquenio 1991-1995 la situación fue crítica debido sobre todo a la disminución de la capacidad de compra del país.

La empresa se propuso a partir del año 2001, entre otros, los siguientes objetivos:

- 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.

Teniendo en cuenta todo lo antes expuesto el objetivo central de este trabajo será, la creación de métodos de trabajo con rigor científico, que permita la aplicación de un sistema de mantenimiento predictivos en sistemas u dispositivos que operen con rodamientos. Que solo es posible de aplicar cuando se cuenta con la instrumentación y preparación técnica necesaria para estos fines.

2.4. Métodos y técnicas aplicadas en la realización del trabajo.

2.4.1 Selección y categorización de equipos de planta.

La categorización de los equipos constituye uno de los pasos elementales para la realización de las operaciones del mantenimiento, referidos a la organización y

aplicación técnica del mismo. La misma determinará el tipo mantenimiento que se debe realizar sobre cada equipo en particular.

En el Anexo 2 está la Clasificación de Equipos por Categorías, A, B, C, se sintetiza la metodología aplicada y los resultados de su aplicación en planta.

Selección de equipos aplicar el diagnóstico en rodamientos.

La base de esta selección para la aplicación del estudio se centra en algunos aspectos fundamentales como:

1. Diversidad de tipos de rodamientos.
2. Importancia del equipo dentro del proceso productivo.
3. Posibilidades de análisis por conocidas averías en el tiempo de servicio.

Tabla 2. Selección de equipos para estudio la aplicación Diagnóstico

No.	Nombre del Equipo	Potencia KW/Hor	RPM	Clasificación	Cantidad
1	Ventiladores Tiro Forzado	1100	1180	B	4
2	Calentadores de Aire Regenerativo (Reductor)	5.5	1130	B	4
3	Ventilador Detectores de Llama.	7.5	3500		

2.4.2 Métodos y Técnicas aplicadas para la determinación de Parámetros de Estado a controlar durante la aplicación del Diagnóstico.

A partir de la categorización de los equipos y de la definición del tipo de mantenimiento a aplicarle a cada uno de ellos, se pasa a determinar los parámetros que definen el estado de los dispositivos que deben ser muestreados

así como su periodo de muestreo. Para esto se desarrollarán una serie de pasos que a continuación se enumeran:

- Resultados del Mantenimiento.
- Análisis y resultados esperados del Espectro
- Análisis de vibraciones y BCU.
- Selección de Parámetros de estado a controlar.
- Obtención de los límites de severidad de las vibraciones. Norma Estándar ISO 10816.
- Resultados de ejemplos de aplicaciones.

2.4.2.1 Resultados del Mantenimiento general en planta.

A partir del estudio realizado en la organización y desarrollo del mantenimiento de la central generadora se ejecutó un análisis para obtener los resultados de las predicciones realizadas a partir del método Causa–Raíz. Este fue llevado a cabo durante los mantenimientos aplicados en esta etapa y en ellos se detectaron las fallas más frecuentes y se comprobaron sus relaciones con los síntomas que las identifican. A continuación se expone una síntesis de estas fallas en los rodamientos:

- Daños producidos al rodamiento en el momento de montarlos en la máquina, atribuibles a técnicas inadecuadas de montaje.
- Lubricación excesiva o inadecuada, que es una de las principales causas de fallo. Se deterioran mucho más rodamientos por exceso de lubricación que por una lubricación insuficiente.
- Mala selección del rodamiento. Por ejemplo, una gran carga axial no va a ser soportada bien por un rodamiento radial de bolas.
- Vibración excesiva, producida por desbalances, desalineamiento, flexiones en eje, otros, que acorta la vida del rodamiento considerablemente.
- Ajuste o tolerancia inadecuada.

Este estudio sirvió de base para el desarrollo de la aplicación del Método de Causa –Raíz que a continuación se desarrollara.

Síntesis de los defectos y parámetros relacionados con las fallas, en rodamientos.

La relación de defectos y probables causas de los rodamientos están centrados en cuatro aspectos fundamentales, que actúan como causas más comunes de defectos que pueden ocasionar fallas en rodamientos entre ellos se citan los siguientes.

1. Defectos propios o naturales de los materiales (fatiga, soporte al torque, fricción).
2. Defectos o fallas propias de la fabricación. Resistencia de materiales, diseños de estructuras del rodamiento, soportes a las cargas dinámicas.
3. Defectos o fallas propias del mantenimiento, operación (mala selección, exceso de cargas estáticas y dinámicas, centramiento, excentricidad, desalineamiento, métodos de calentamiento, daños al montaje).
4. Defectos o fallas por lubricación (Lubricante mal seleccionado, contaminación, defectos en los sistemas de enfriamiento).

Tabla 3. Resumen de fuente de fallos en rodamientos.

Proceso	Fuente de fallos
Fabricación	No homogeneidad de los materiales Tolerancias en las dimensiones
Almacenaje/Transporte	Embalaje deficiente Daños de Vibración localizados
Instalación/Montaje	Esfuerzos debidos a distorsión Pre-carga incorrecta Tolerancias en las dimensiones Desalineamientos
Operación	Sobrecarga Lubricación deficiente Presencia de partículas extrañas (e.j. suciedades, arena etc.) Presencia de materiales extrañas (e.j. gases

	agresivos, humedad, etc.) Cargas térmicas
Fuentes	Probabilidad relativa en %
Deterioro	51
Roce	25
fatiga	18
Corrosión	8
Sobrecarga	49
Deformación	14
Rotura	12
Agrietamiento	12
Sobrecalentamiento	11

Los síntomas de fallas para detectar defectos de predicción en rodamientos.

La detección prematura de fallos en rodamientos exige un buen conocimiento de las técnicas de diagnóstico, la sintomatología y la evolución de la misma conforme el daño va siendo mayor. Las características espectrales típicas de este tipo de defecto mecánico son las siguientes:

- Altos niveles de vibraciones
- Existencia de picos armónicos no sincrónicos.
- Cuando el rodamiento sigue deteriorándose, el espectro presenta bandas laterales a la frecuencia del eje de giro 1x rpm.
- Puede desarrollarse una banda ancha de energía en la base del espectro.
- La onda en el tiempo presenta impactos (se mide en G's).

2.4.2.2 Análisis fundamental de Frecuencia de las Vibraciones, aplicados en la detección de posibles defectos.

En lo siguiente, acerca de Prácticas de Mantenimiento si nos introducimos en el concepto de **mantenimiento proactivo** se puede definir como una extensión del mantenimiento predictivo que incluye la determinación de las razones de fallas en las máquinas. Aunque es importante y económicamente viable detectar las fallas en máquinas en sus primeros niveles y de corregirlas antes de que provoquen un paro de la máquina, el hecho de solamente reemplazar la parte que presenta el

defecto, como el rodamiento por ejemplo, aunque corregirá el problema del momento y permitirá a la máquina funcionar, no corrige la causa que provocó la falta en el rodamiento.

El análisis fundamental de fallas, es análogo a la práctica en la medicina de buscar la causa básica de una enfermedad y de tratarla, en lugar de tratar los síntomas.

La disciplina que precisamente se dedica a este, se llama el Análisis Fundamental de Causas de Faltas (AFCF), y será instructivo analizar algunas de las técnicas que se usan en esta tecnología. Este análisis consta de varios pasos:

1. Determinar qué componentes de la máquina son responsables del problema.
2. Determinar la causa de la falla que se detectó.
3. Tomar las medidas apropiadas para eliminar la causa identificada del problema. Un ejemplo sería de llevar a cabo una alineación de precisión en una máquina propensa a fallas en rodamientos, por causa de carga radial excesiva.
4. Examinar y analizar otras máquinas del mismo tipo y llevar a cabo las mismas tareas preventivas, si necesario.
5. Rediseñar la instalación de la máquina o la misma máquina para eliminar la posibilidad de que el mismo problema vuelva a presentarse en el futuro. En otras palabras eliminar el problema por medio de diseño.

Los pasos iniciales para realizar el análisis de vibración manual son:

1. Identificación de los picos de vibración en el espectro y relacionándolos con frecuencias forzadas.
2. Determinación de la gravedad de problemas de máquina basándose en las amplitudes y la relación entre los picos de vibración.
3. Hacer las recomendaciones apropiadas para las reparaciones, basadas en la gravedad de los problemas de máquinas.

Para realizar un buen trabajo de análisis de vibración se necesitan varias herramientas. Si los espectros de vibración se analizan en una computadora, se necesita lo siguiente: una calculadora y una Guía para el Análisis de Pruebas de Vibración para la máquina. Si los espectros fueron impresos en papel, una regla y un compás de diez puntos son necesarios. Los datos recopilados con anterioridad y los promedios de datos de vibración también son útiles, si están disponibles.

Base de datos. Guía para pruebas y análisis de Vibración en Rodamientos (GPAVR)

La GPAVR contiene informaciones importantes acerca del diseño de la máquina, los puntos de prueba y su ubicación, los rangos de frecuencias que se van a probar y las frecuencias forzadas que se pueden esperar. Se debe consultar el GPAVR antes de intentar cualquier análisis de vibración. GPAVR típicos son los objetivos de este trabajo, donde se realiza un análisis de todos los rodamientos y engranes de los equipos de 6 KV entre otros. Donde queda reflejado:

1. Nombre del equipo
2. Velocidad de rotación (frecuencia fundamental de giro)
3. Tipo de rodamiento, con todos los datos que se corresponden y permiten enunciar la frecuencia de falla esperada en los espectros.

Análisis de espectros paso a paso

En preparación para las técnicas descritas en el capítulo siguiente, el primer paso del análisis debería ser llevado a cabo como sigue:

Este procedimiento supone que los espectros de vibración están impresos en papel. Cuando examinamos **espectros** en la pantalla de la computadora, se usan procedimientos similares,

Noten que los pasos siguientes serán simplificados de manera importante si los espectros son normalizados en órdenes.

Identificar el pico de primer orden (1x)

El primer paso en el análisis de vibración de máquina es la identificación del pico espectral que corresponde a la velocidad de rotación de la flecha, o sea el llamado pico 1x. Esto será el 1x en un espectro **normalizado**. Es importante de verificar si la normalización se hizo de manera correcta. También se llama el pico de primera orden. En máquinas con flechas múltiples, cada flecha tendrá un pico característico 1x, y el analista los podrá localizar.

Noten que en máquinas con flechas múltiples, que giran a velocidades diferentes, cada flecha tendrá un grupo de armónicos 1x, relacionado con este pico.

Muchas veces, los picos 1x de la flecha van acompañados de una serie de armónicos o de múltiplos enteros de 1x y esto ayuda a encontrarlos. Una buena confirmación del pico de primera orden es la existencia de otras frecuencias forzadas conocidas como el paso de alabes de la impulsora de la bomba. Por ejemplo, si la bomba tiene seis alabes en la impulsora, normalmente habrá un fuerte pico espectral en 6x, o sea en el sexto armónico de la velocidad de revolución. También a veces aparecerán armónicos de la velocidad de los alabes de la impulsora.

Máquina de flechas múltiples

Ejemplo para un motor y una bomba activada por engranes.

1. Identifique y anote el pico 1x del motor y los armónicos en los espectros.
2. Identifique y anote el pico 1x y los armónicos de la bomba en los espectros. Las RPM de la bomba se pueden encontrar con la GAPV o se puede calcular desde la velocidad del motor y de la proporción de engranes como sigue: si el motor está girando a 1780 rpm y la proporción de engranes es de 2.3 a 1, entonces la velocidad de la bomba es $\frac{1780}{2.3} = 774$
3. Identifique y anote la frecuencia del paso de alabes de la bomba y sus armónicos, si es que los hay en los espectros. El paso de alabes es el número de alabes multiplicado por las RPM de la bomba.

4. Busque en los espectros los componentes no síncronos que podrían ser tonos de rodamientos, o consulte la GAPV para las frecuencias de tonos de rodamientos y anótelas en los espectros.
5. Después de haber llevado a cabo todas estas tareas, estarán listos para el trabajo descrito a continuación: Diagnóstico de Máquinas.

Diagnóstico de máquinas

Después de la verificación de la validez de los espectros y de la identificación positiva de los picos espectrales especialmente los componentes $1x$, el diagnóstico de los problemas de máquinas puede empezar. La sección siguiente hace la relación entre los problemas de máquina y sus firmas de vibración correspondientes.

Remolino de aceite. Es una condición en la que ocurre una fuerte vibración entre $0.38x$ $0.48x$. Nunca aparece en exactamente $0.5x$, si no que siempre está un poco más bajo de frecuencia. Está causado por un juego excesivo y una carga radial ligera, lo que resulta en una acumulación de la película de aceite y obliga al gorrón a emigrar en la chumacera a menos de la mitad de las RPM. El remolino de aceite es una condición seria, que necesita corrección, cuando se encuentra, ya que se puede deteriorar rápidamente hasta el punto donde hay contacto de metal a metal en el rodamiento.

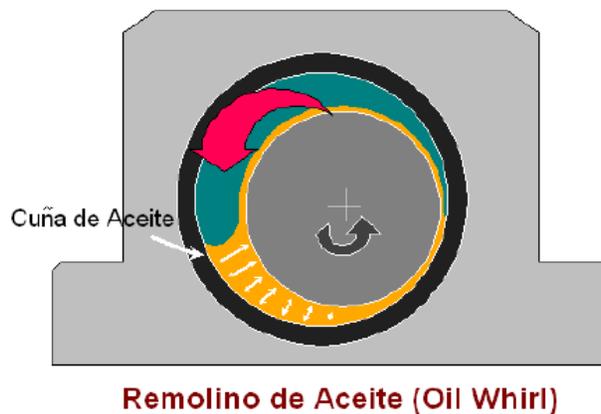


Figura 3. Representación de cuñas de aceite

Holgura de rodamiento

A veces una holgura mecánica extrema en una parte que no sea un rodamiento genera un espectro como este.

La holgura mecánica provoca la aparición de armónicos de 1x y en casos severos semiórdenes de 0.5x estarán presentes. Muchas veces la causa de las semiórdenes es el rechinido del rodamiento en su cárter. A veces se ven órdenes de un tercio y un cuarto, en ejemplos extremos de holgura.

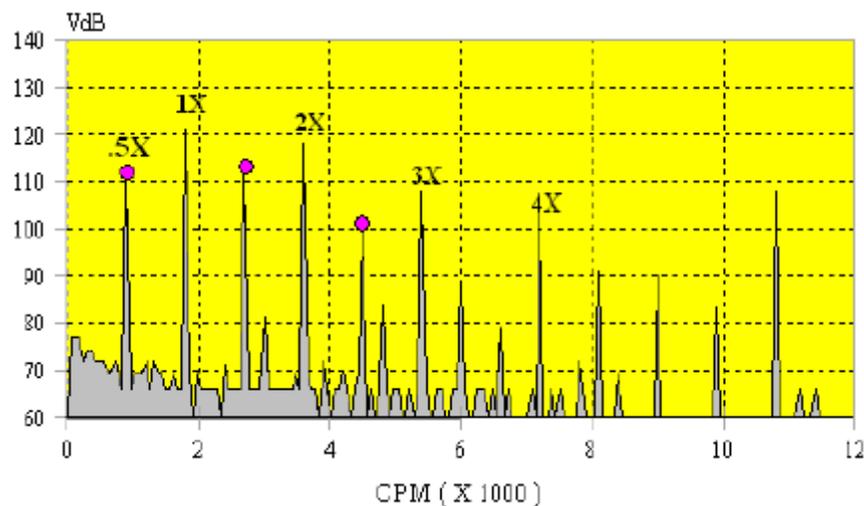


Figura 4. Holgura de cárter de rodamiento con gorrón.

Los armónicos de 1/2, 1/3 y 1/4 de orden a veces se llaman subarmónicos.

Rodamientos de empuje

Los rodamientos de empuje desgastados por lo general presentan fuertes componentes axiales, en los primeros armónicos de 1x. Rodamientos Kingsbury gastados, con 6 zapatas generarán un pico en 6x. Este pico de vibración está de manera predominante en la dirección axial.

Rodamientos con elementos rodantes

En muchos años de experiencia hemos encontrado que en la práctica, menos del 10% de todos los rodamientos funcionan durante su tiempo de vida esperado.

Alrededor de 40% de fallas de rodamientos ocurren debido a una lubricación inadecuada, y alrededor de 30% de fallas ocurren debido a un montaje incorrecto, eso quiere decir desalineación. Alrededor del 30% fallan por otras causas como sobrecarga y defectos de manufactura.

Aparte de los componentes no síncronos, los rodamientos con faltas también pueden causar ruido de banda ancha en el espectro de vibraciones. En un estado más avanzado puede causar el calentamiento del rodamiento hasta su destrucción total.

Los problemas de rodamientos con elementos rodantes son las fallas más comunes que se diagnostican en análisis de vibración. Un rodamiento defectuoso producirá componentes de vibración que no son múltiplos exactos de 1x, en otras palabras, son componentes no síncronos. La existencia de componentes no síncronos en un espectro de vibraciones es una bandera roja para el analista que indica que puedan existir problemas de rodamientos y que el analista inmediatamente debería de excluir otras posibles fuentes de este tipo de componentes para verificar el diagnóstico.

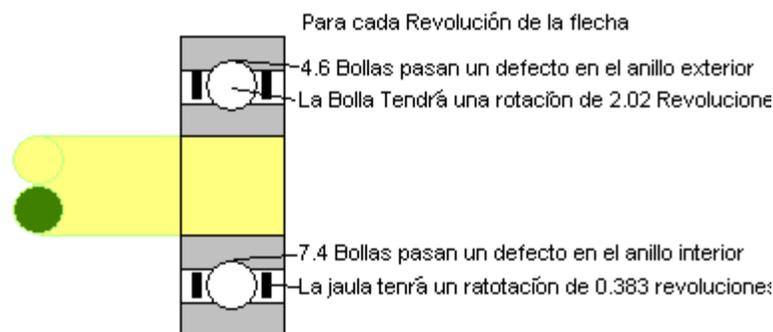


Figura 5. Componentes de un rodamiento

A continuación encontrarán las fórmulas para el cálculo de las frecuencias de los **tonos de rodamiento** a partir de la geometría del rodamiento. Tiene un poco de imprecisión ya que la carga axial y los efectos de deslizamiento les afectan en una manera impredecible.

$$BPFI = \frac{n}{2} \left(1 + \frac{B_d}{P_d} \cos \theta \right) RPM$$

$$BPFO = \frac{n}{2} \left(1 - \frac{B_d}{P_d} \cos \theta \right) RPM$$

$$BSF = \frac{P_d}{2 B_d} \left[1 - \left(\frac{B_d}{P_d} \right)^2 (\cos \theta)^2 \right] RPM$$

$$FTF = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{B_d}{P_d} \cos \theta \right) RPM$$

- BPFI = Frecuencia de paso de bolas, anillo interior
- BPFO = Frecuencia de paso de bolas, anillo exterior
- BSF = Frecuencia de rotación de la bola
- FTF = Frecuencia fundamental de tren
- B_d = Diámetro de la bola
- P_d = El módulo de rodamiento
- n = número de elementos rodantes
- θ = ángulo de contacto

La FTF misma aparece raramente en un espectro de rodamientos. Por lo general está involucrada con actividad de bandas laterales como lo explicamos a continuación.

A continuación damos unas aproximaciones de frecuencias de tonos de rodamientos para los rodamientos más comunes.

- Falla en el anillo exterior: Número de rodillos multiplicado por las RPM por 0.4
- Falla en el anillo interior: Número de rodillos multiplicado por las RPM por 0.6
- Frecuencia Fundamental de Tren (FTF) = RPM por 0.4

El número de rodillos en la mayoría de los rodamientos es generalmente entre 8 y 12, pero en rodamientos con un diámetro muy ancho, como los que se encuentran en las máquinas de papel, el número de rodillos puede ser más alto.

Desgaste en rodamientos con elementos rodantes

Los primeros estados de fallas de rodamientos, producirán frecuencias de vibración no síncronas, que se llaman "tonos de rodamientos", y sus armónicos. Tonos de rodamientos a 0.006 pulgadas por segundo pico (81 VdB) o más alto son considerados significativos. A veces un rodamiento nuevo producirá un tono de rodamiento, posiblemente debido a daños durante la instalación o el transporte o defectos de manufactura.

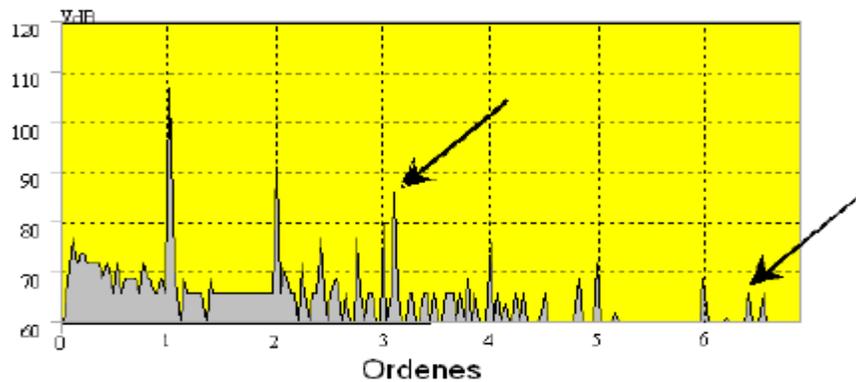


Figura 6. Tonos de rodamiento a 3.2x

Si el defecto de rodamiento es de tamaño muy pequeño, como una grieta en uno de los anillos, la firma de vibración tendrá armónicos del tono de rodamiento y habrá poca o ninguna frecuencia fundamental. Si el defecto empieza como una astilla en un área más grande del anillo, la fundamental del tono de rodamiento estará más alto en nivel que los armónicos. A medida que el defecto empeora, el nivel general de tonos de rodamiento se va a incrementar y también el nivel general de ruido de banda ancha.

Bandas laterales

Si el defecto se encuentra localizado en el anillo interior del rodamiento, la velocidad de rotación modulará en amplitud los tonos de rodamiento, y esto provocará bandas laterales alrededor de los tonos de rodamiento, a una distancia de 1x. La modulación de amplitud proviene del hecho que el defecto en el anillo interior entre y salga del área de carga del rodamiento una vez por revolución.

Mientras que está en el área de carga el defecto producirá vibración a la frecuencia del paso de bolas, pero cuando está fuera del área de carga muy poca vibración se producirá en esta frecuencia.

Esto explica la modulación de amplitud del tono de rodamiento y las bandas laterales consecuentes. Bandas laterales a una distancia de $1x$ de tonos de rodamiento son una indicación segura de desgaste en el rodamiento, que va avanzando. A veces, si un rotor está fuertemente desbalanceado un defecto de rodamiento en el anillo interior no producirá modulación de amplitud o bandas laterales. Esto se debe a que la fuerza centrífuga causada por el desbalanceo mantiene el anillo interior cargado en el mismo lugar en su periferia todo el tiempo.

Otro ejemplo de bandas laterales en espectros de rodamientos involucra la frecuencia fundamental de tren (FFT). Esto es el ritmo a que la jaula, que mantiene los rodillos, gira en el rodamiento. Si un rodillo está astillado, cuarteado o peor, en varios pedazos, hará mucho ruido cuando está en el área de carga del rodamiento, pero será silencioso, cuando está fuera de esta área. Entrará y saldrá del área de carga al ritmo de la FFT, ya que migra alrededor del rodamiento con la jaula. Esto provocará modulación de amplitud de los tonos de rodamiento al ritmo FFT y el resultado son las bandas laterales alrededor de los tonos de rodamiento a la distancia FFT.

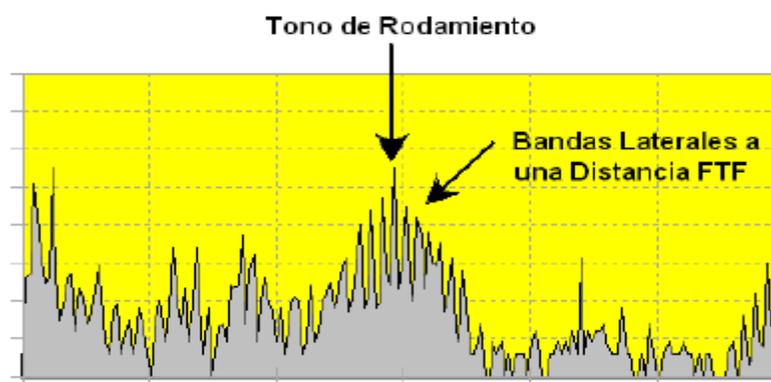


Figura 7. Espectro con bandas laterales

El estado final de desgaste en rodamientos a veces se llama estado termal, es el en que el rodamiento se calienta y hecha a perder el lubricante, lo que lleva a una falla catastrófica que puede incluir que se fundan los rodillos y/o los anillos.

La clave para un mantenimiento efectivo predictivo de los rodamientos es el establecer tendencias de niveles de tonos de rodamientos en el tiempo y desde su inicio. A veces una condición en un rodamiento progresará desde una falta muy pequeña hasta una falta total en un tiempo relativamente corto. Una detección temprana necesitará sensibilidad a los componentes muy pequeños de la firma de vibración. El analista deberá tener en mente que algunos tipos de máquinas tendrán tonos de rodamiento en los espectros promedios El diagnóstico se hace basándose en incrementos significativos de estos valores promedios. Cualquier tono de rodamiento significativo se deberá vigilar con cuidado para darse cuenta si está empeorando.

Rodamientos con elementos rodantes desalineados (Chuecos)

Una gran cantidad de fallas se puede atribuir a una instalación incorrecta.

Un rodamiento chueco generará un componente 1x significativo y algo de 2x en el espectro de vibración, por lo general de manera predominante en la dirección axial. En algunos casos, la dirección dominante puede ser radial. Un rodamiento chueco casi siempre provocará tonos de rodamiento fuertes, así como altos niveles de 1x y 2x.

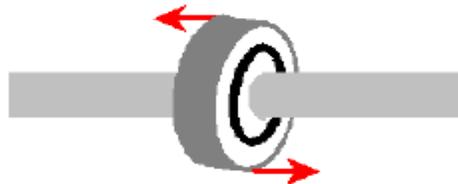


Figura 8. Rodamiento chueco

Holgura de rodamientos con elementos rodantes

Un juego excesivo en un rodamiento con elementos rodantes producirá armónicos de 1x usualmente en un rango de 2x hasta 8x. Holgura extrema generalmente produce componentes de medio orden, en múltiplos de 0.5x. Holgura en otras partes de la máquina también producirá armónicos 1x y a veces armónicos 0.5x, así que esto no es una señal que permite concluir la presencia de juego en los rodamientos.

Holgura mecánica

Las holguras rotativas y no rotativas generarán fuertes armónicos 1x.

La holgura mecánica puede ser de dos tipos: *holgura rotativa* o *no rotativa*. Una holgura rotativa está causada por un juego excesivo entre las partes rotativas y estacionarias de la máquina, y la holgura no rotativa es una holgura entre dos partes que normalmente son estacionarias, como una pata de máquina y su base. Los dos tipos de holgura producirán armónicos 1x intensivos en los tres ejes de vibración.

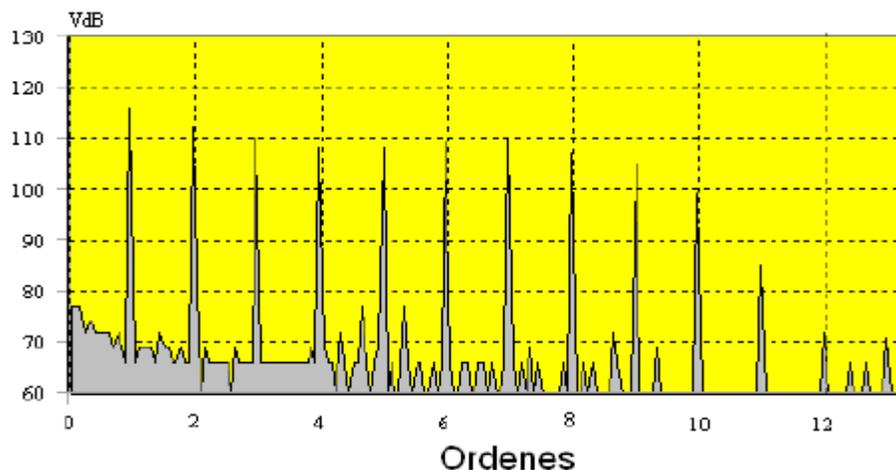


Figura 9. Holgura mecánica

Holgura rotativa

Un juego excesivo en un rodamiento con gorrón puede producir armónicos de 0.5 RPM. Estos se llaman componentes de medio orden o subarmónicos y se producen por partes que se rozan o que se impactan.

El juego excesivo en chumaceras y rodamientos a elementos rodantes, producirá armónicos de 1x que en algunos casos se pueden extender hasta arriba de 10x. Si se acentúan los armónicos superiores, se puede sospechar de impactos. Los impactos se ven mejor en la forma de onda de tiempo, que en el espectro, y por eso si hay altos armónicos es una buena idea de examinar la forma de la onda de aceleración para encontrar picos debido a impactos.

Holgura no rotativa

La holgura entre una máquina y su base incrementará el componente de vibración 1x en la dirección de la menor rigidez. Por lo general, esa es la dirección horizontal, pero eso depende de la estructuración horizontal de la máquina. Armónicos 1x de bajo orden también se producen si la holgura es grave. A veces es difícil distinguir entre desbalance y holgura de la base, o flexibilidad, especialmente en máquinas verticales. Si la tangencial 1x es mucho más grande que la radial 1x, se sospecha holgura. Si la tangencial 1x es inferior o igual a la radial 1x se sospecha desbalance. La flexibilidad de la base u holgura puede ser causada por pernos flojos, corrosión o cuarteaduras en la estructura de montaje.

Frecuencias de fallas asociadas directa e indirectamente con los defectos en rodamientos.

Tabla 4. Defectos mecánicos asociados al síntoma frecuencia de armónicos

Defectos	Frecuencia de fallas
El roce mecánico	Familia de armónicos de 1n
Defectos en rodamientos	(20 -25) n
Desbalance mecánico, excentricidad	Es típico en 1n.
Defectos en película de aceite	(0.48 - 0.509) n.
El desalineamiento mecánico	(1,2,3,4) n

2.4.2.3 Tendencia en el crecimiento de los niveles de la medida del BCU.

La figura 10 del artículo (Marín, 1997), expone a caracterización del parámetro BCU, el cual es un indicador extremadamente confiable para el análisis de defectos en rodamiento y sistemas de engranes, es una valoración cuantitativa de la energía de la magnitud vibraciones. Medibles en rangos de alta frecuencia con filtros de pasa alta, que no dan paso a vibraciones de baja frecuencia.

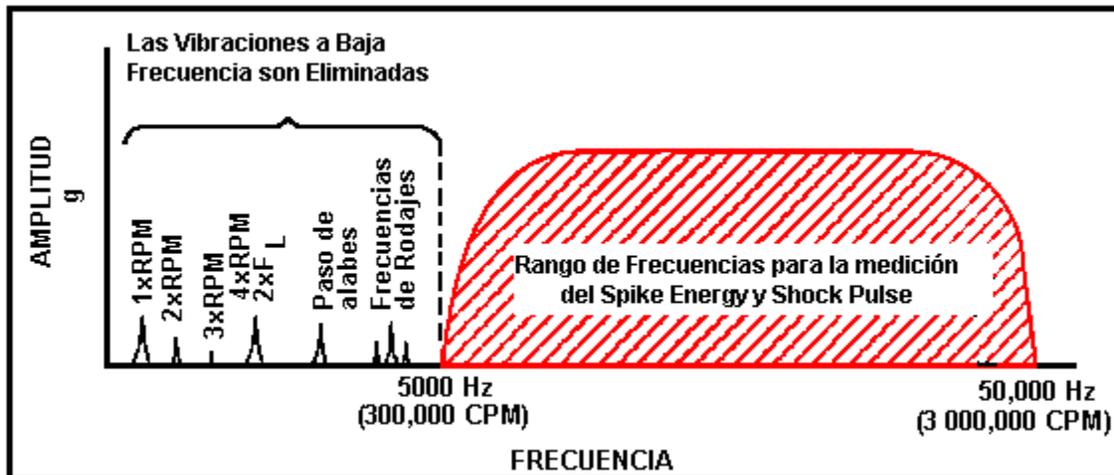


Figura 10. Rangos de frecuencia del BCU

Los parámetros del BCU medibles con instrumento Vibrotest 60, tiene rangos permisibles normados cuyo valor máximo está en el orden de 8.

2.4.2.4: Selección de Parámetros de estado a controlar.

Los parámetros de estado a controlar, para determinar las probabilidades de un defecto en rodamiento. Según las estadísticas y experiencias de expertos en el mantenimiento en sentido general pueden ser, las que se relacionan a continuación.

Ruido, la escucha o el empleo de un estetoscopio.

Temperatura, medición con instrumento o a través del tacto.

Alto consumo de energía, medición con instrumento.

La amplitud de las vibraciones. Indica la severidad del defecto.

Vibraciones y el espectro vibracional, medición con instrumento, permite identificar que parte del rodamiento tiene el defecto, según las frecuencias esperadas calculables a partir de las ecuaciones sintetizadas en la tabla 4.

El análisis de la señal vibratoria en el tiempo.

2.5: Obtención de los límites de severidad de las vibraciones. Valores patrones.

Las normas ISO 10816, proporciona guías para aceptación de la amplitud de vibración, para maquinaria rotativa operando desde 600 hasta 12 000 RPM. Especifican los límites de la velocidad de vibración basándose en los caballos vapor de la máquina y cubre un rango de frecuencias desde 10 Hz hasta 1 000 Hz. Debido al rango limitado de alta frecuencia, se puede fácilmente dejar pasar problemas de rodamientos con elementos rodantes.

Estas normas que datan de 1974 como la ISO 2372, Se han usado por muchos años y se consideran como pasadas. Se basan en un espectro de desplazamiento (mil pico) que es equivalente a una velocidad constante de 0-13 pulgadas por segundo (107 VdB) arriba de 1200 RPM. Esas normas siguen siendo usadas como una referencia aproximada para niveles aceptables de vibración para máquinas sencillas, de tamaño medio, como motores de bombas eléctricas, pero no se deben usar como una norma absoluta. En la actualidad se trabaja con las ISO 10816 con concepciones mas recientes.

No se trata de saber **cuanta vibración** debe tener una maquina antes de romperse, si no a que valores debemos intervenir antes de que suceda la falla, para ello es indispensable un cúmulo de conocimientos y valores de monitoreo capaz de realizar evaluaciones históricas del comportamiento de la máquina.

Los limites de vibraciones no resultan absoluto, ya que el hecho de rebasarlos o no, quiera decir la linealidad de una falla, se trata en este caso de un entorno que limitan los buenos estados y malos estados de funcionamiento de los equipos.

En la actualidad se trabaja más bien con los cambios de las vibraciones medidas a nivel total, como medio de control durante la explotación de los equipos.

Normas de vibraciones ISO 10816/96 Vibraciones absolutas

Evaluación de la severidad de las vibraciones. Se aplica a mediciones sobre elementos no rotatorios. Chumaceras, pedestales, bases y otros como:

- 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.

Tabla 5: Estándar ISO 10816. Parte 3 Severidad de vibraciones

m/S RMS	Clase I	Clase II	Clase III	Clase IV
0,28	A	A	A	A
0,45				
0,71				
1,12	B	B	B	B
1,8				
2,8	C	C	C	C
4,5				
7,1	D	D	D	D
11,2				
18				
28				
45				

Donde: A-Normal B- Admisible C- Limite aún admisible D- No permisible.

ISO 10816. 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).

Valores patrones de vibraciones a nivel total.

Son aquellos que se toman de valores promedios históricos del comportamiento vibracional, a partir de análisis de tendencia, bases de datos que relacionen los niveles de vibraciones con los defectos asociados a cada caso.

Para el caso de espectros de frecuencia se toman los análisis de frecuencia que contienen, los mejores resultados de un buen mantenimiento del equipo, o del comportamiento en buen estado durante un ciclo de trabajo.

Conclusiones parciales del Capítulo II.

En este capítulo se aborda una caracterización del objeto de estudio, que abordan desde el estado actual hasta las proyecciones futuras. Además de que se realiza un estudio teórico de los métodos y técnicas aplicadas para la introducción del mantenimiento por diagnóstico en rodamientos dirigidos a:

- Estudio de las vibraciones y Análisis fundamental de Frecuencia de las Vibraciones, aplicados en la detección de posibles defectos.
- Estudio de las Frecuencias de fallas asociadas directa e indirectamente con los defectos en rodamientos.
- Se realiza una selección sobre la base del estudio realizado de los parámetros de estado a controlar, como síntomas de avería en rodamientos.
- Se realiza un estudio de las Normas ISO, relacionadas con los niveles de severidad de las vibraciones que permite la obtención de los límites de las mismas
- Se realiza un análisis del estado actual de la termoeléctrica desde el punto de vista técnico para poder asimilar estas nuevas propuestas técnicas.

El análisis teórico desarrollado en este capítulo permite contar con todos los detalles necesarios para la aplicación práctica de esta investigación.

Capítulo III. Resultados técnico económico obtenidos a partir de la aplicación del sistema de mantenimiento por diagnóstico en rodamientos.

3.1: Resultados Técnico-Económico del comportamiento del método en Ventilador de Tiro Forzado (VTF).

3.1 Principio de funcionamiento del VTF. Y Base de datos.

El sistema de aire para la combustión consta de dos ventiladores de tiro forzado, encargados de suministrar el aire para la combustión garantizando siempre un exceso de aire que evite la incombustión y asegurar además la circulación de los gases y su expulsión por la chimenea, teniendo en cuenta que esta es una caldera presurizada y por tanto no posee ventiladores de tiro inducido.

El aire de la descarga de los ventiladores pasa por precalentadores de aire y los CAR donde adquiere la temperatura adecuada y de allí a la caja de aire para su distribución a cada quemador. Un conducto situado en la descarga de los VTF garantiza el aire a los diferentes consumidores de la caldera.

Tabla 6. Parámetros técnicos Ventilador Tiro Forzado (VTF) y Parámetros del Motor

Parámetros del Ventilador		Parámetros del Motor	
-Tipo doble succión		Peso del rotor del Motor	2000 Kg
Capacidad (m ³)	4894 m ³ /min	Radio del Rotor del Motor	700 mm
-Presión de succión atmosférica		Velocidad (rpm)	1200
Presión de descarga (mm H ₂ O)	1080 mmH ₂ O	Potencia del motor (Kw)	1100 Kw
Temperatura de entrada (°C)	25	Voltaje (V)	6000
-Son de Flujo Radial		Pares de polos	6
Numero de aspas	10	Velocidad (rpm)	1200

Presentan dos Chumaceras Radiales		Potencia del motor (Kw)	1100
Peso del Ventilador	2575 KG	Voltaje (V)	6000
Radio del Ventilador	1000 mm	Pares de polos	6
		Rodamiento CH1 Motor lado libre	NU326
		Rodamiento CH2 Motor lado cooplign	6330 CE3

Tabla 7 Datos de rodamientos del motor VTF para cálculos de frecuencia de fallas

	Rodamiento	Ø Ext (D)	Ø Int (d)	Ancho (B)	Angulo Contacto (α)	# de Bolas (Nb)	Diam. Bola (α)
CH 1	NU 326	280	130	58	0	13	38
CH 2	6330 CE3	320	150	65	0	9	47.63

3.2 Principio de funcionamiento del calentador de aire regenerativo y base de datos. Calentador de Aire Regenerativo. (CAR)

El CAR es un intercambiador de calor donde una masa de gases procedentes del eje convectivo luego de entregar el calor en la caldera entrega el calor a una masa metálica que se encuentra girando, calentándola; este metal al hacer contacto con la masa de aire frío la calienta hasta una temperatura adecuada. Este tipo de intercambiador presenta ventajas con respecto a los de tipo tubular ya que es más eficiente, las temperaturas del metal son uniformes y se eliminan los focos de calor.

En su conjunto cada CAR cuenta con tres grupos de cestos que se colocan en forma horizontal en tipo cuña. Los grupos se colocan verticalmente formando los cestos calientes, tibios y los fríos. La fuente para el giro del CAR la constituye un motor que se alimenta de 380 V a través de un reductor con una rueda dentada. El CAR se apoya en dos chumaceras, superior e inferior las cuales son enfriadas con agua procedente del circuito de enfriamiento, y cuenta además con compuertas de cierre tanto por la parte de aire como por la parte de gases así como con tuberías para el lavado de estos en explotación y registros para el acceso al interior de este, posee además un motor de aire que permite el giro de este en caso que no pueda usarse el motor eléctrico. Para la limpieza de las superficies de intercambio el CAR esta equipado con un soplete tipo oscilante movido por un motor de 380 v dirigido desde un panel en BTG.

Tabla 8: datos técnicos del CAR

Datos técnicos del CAR	
Cantidad	2 x caldera
Tipo	regenerativo vertical
Flujo de gases a (MCR)	568t/h
Flujo de aire a (MCR)	524t/h
Temperatura de los gases a la entrada	337°C
Temperatura de los gases a la salida	144°C
Temperatura del aire a la salida del CAR	304°C
Superficie de calentamiento	12000m ²
Material de la placa extremo caliente	acero dulce
Material de la placa intermedia	acero dulce
Material de la placa extremo frío	acero resistente a la corrosión (acero CORTEN)
Datos técnicos Motor.	

Velocidad del motor	1785 RPM
Corriente	10 Amperes
Voltaje	380 Volts

En el Anexo 3 se presentan los sistemas de engrane del reductor del CAR y los datos de los rodamientos del sistema en general. De la misma se obtienen los datos que aparecen a continuación.

Tabla 9 Datos de rodamientos reductores de CAR para cálculos de frecuencia de fallas

	Rodamiento	Ø Ext (D)	Ø Int (d)	Ancho (B)	Angulo Contacto (α)	# de Bolas (Nb)	Diam. Bola (α)
C.A.R	6308	90	40	23	0	8	15.08
C.A.R	22212	110	60	28	9.08	18	12.5
C.A.R	32218	160	90	40	15.65	20	18.41
C.A.R	22218	160	90	40	9.14	18	17
C.A.R	22316	170	80	58	8.58	18	14

3.3 Principio de funcionamiento del Ventilador Detector de Llama (VEDLL) y Base de datos.

El VEDLL es un agregado horizontal centrífugo de succión simple accionado por un motor de 380 Volt ubicado en el primer piso de la caldera. Son dos ventiladores, de ellos, uno en servicio y el otro en reserva que se conecta en los siguientes casos:

- Por sobrecarga en el motor del VEDLL que se encontraba en servicio.
- Por caída de la presión en la tubería de descarga a <300 mmH₂O.

La función del VEDLL es suministrar aire para el enfriamiento del lente de los detectores de llama de los quemadores. Se pone en servicio antes que los VTF para evitar que se ensucien los detectores de llama y se ponen fuera de servicio después que todos los demás equipos, cuando la temperatura de los gases de salida de la caldera es menor de 50°C.

Para su correcto funcionamiento posee instrumentos de medición locales y a distancia en BTG. Las llaves de mando están en BTG, y se cambian según cronograma cada 15 días.

3.4: Ejemplos práctico de la aplicación de estas técnicas antes mencionadas, que han permitido la reducción de las averías en equipos con rodamientos.

Teniendo en cuenta la Figura a continuación. Comportamiento General de defectos en rodamientos. Se realiza un análisis de trabajos de diagnóstico, para los casos ejemplo, Motores de Ventiladores de Tiro Forzado, Motor Ventilador Detector de Llamas y un análisis espectral del Motor Reductor de Calentadores de Aire Regenerativo. Que muestran la efectividad de la aplicación de técnicas de diagnóstico como las descritas en este trabajo.

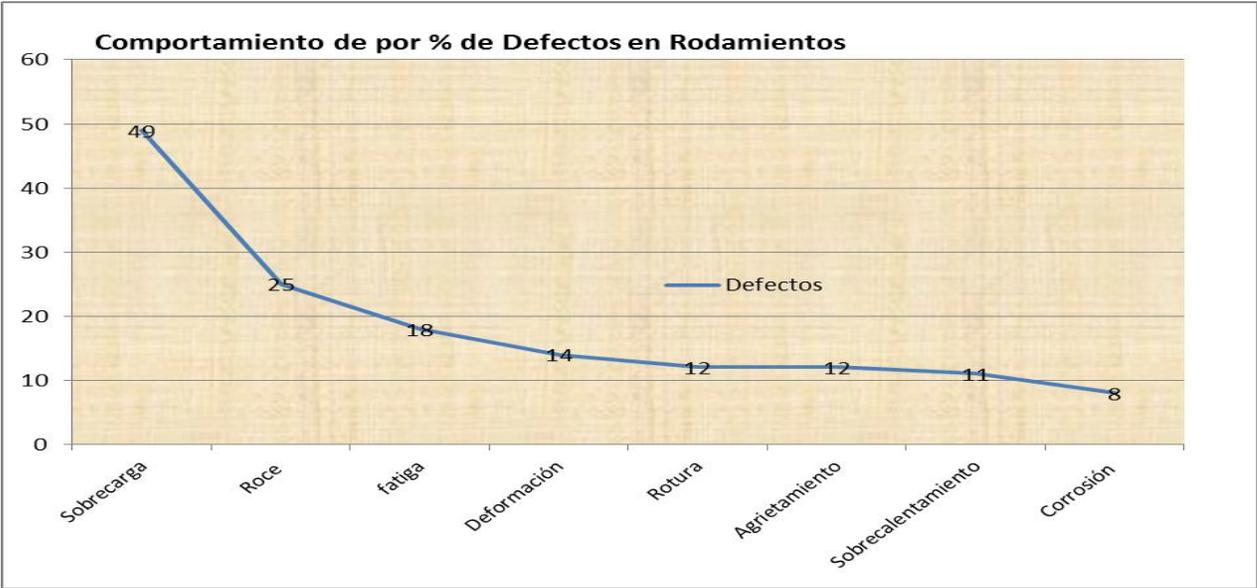


Figura 11: % de defectos en rodamientos

Antecedentes para los análisis de VTF.

Comportamiento según las estadísticas de bases de datos existentes en planta.

Se cita en este ejemplo el análisis de una avería ocurrida en los rodamientos de un Ventilador Tiro Forzado de la unidad IV.

- Niveles totales bajos de la magnitud vibraciones: para el caso de los motores de los ventiladores, de manera que resulta fácil identificar cualquier defecto espontaneo que ocurra en los mismos.
- El control del parámetro BCU: reporta valores muy por debajo del **valor máximo permisible 8.00**, solo se registran de manera significativa valores en el orden de 2.5 a 3.2 BCU, en cuyos casos ha significado carencia de grasa, que se han corregido de inmediato.
- Los análisis espectrales muestran en la mayoría de los casos problemas de **frecuencia media**, y **frecuencias en la rotacional**, estando asociados a posibles desalineamiento, y desbalances mecánicos, en los 2 casos corregidos en su totalidad en el mantenimiento.

Como resultados de esta aplicación se ha logrado mantener funcionado rodamientos en los motores de estos equipos por **más de 10 años de servicio sin interrupciones y averías**, en deprimente del sistema MP **sustituido por MPD** y la detección oportuna de fallas en los mismos.

3.3.1 En el ejemplo a continuación muestra una aplicación práctica determinada por la investigación de una falla ocurrida en el VTF 4A durante el año 2009.

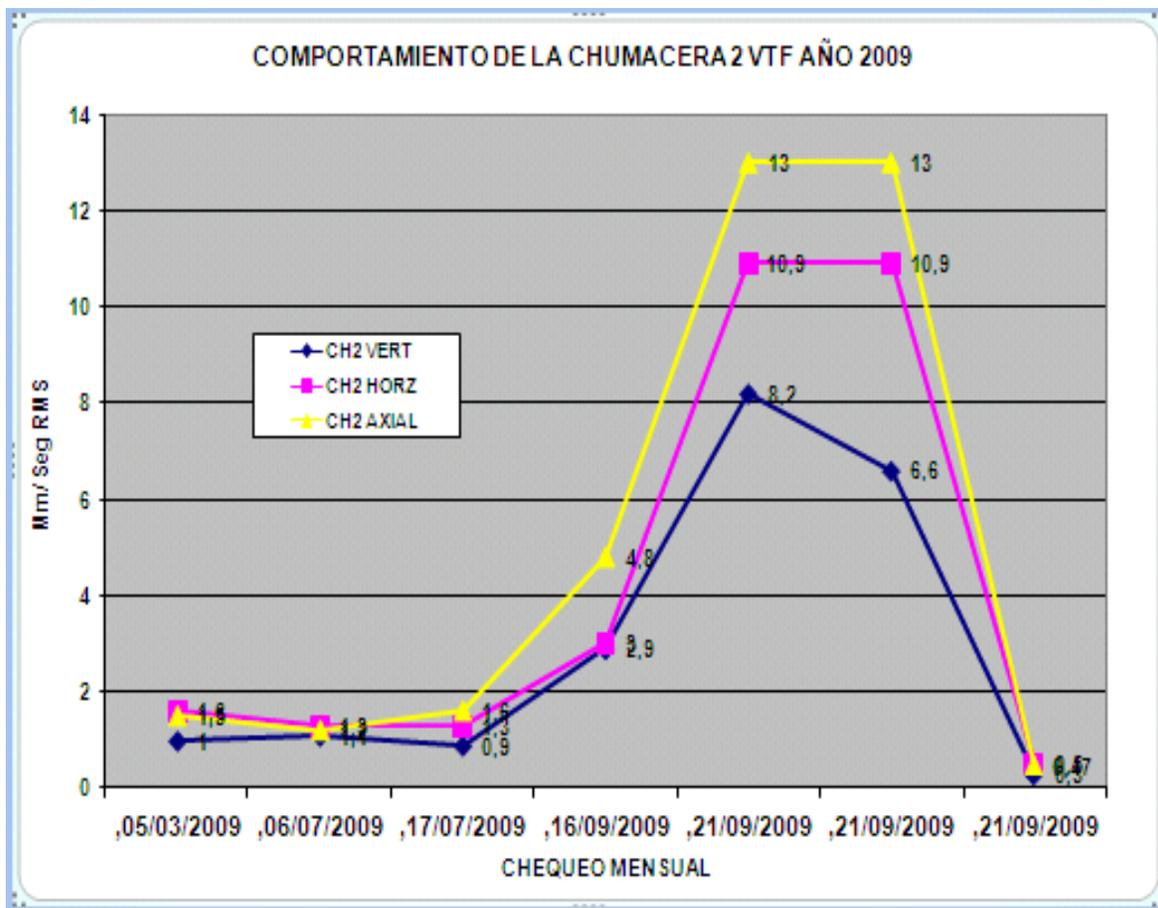


Figura 12: Análisis de tendencia del VTF 4A anterior a una posible falla en rodamientos

En la gráfica anterior, Se puede apreciar como un sistema adecuado de monitoreo permite reconocer con antelación la aparición de una falla atendiendo a los parámetros síntomas controlados. Para el caso la tendencia del crecimiento de la magnitud Vibraciones en la CH2 motor lado libre

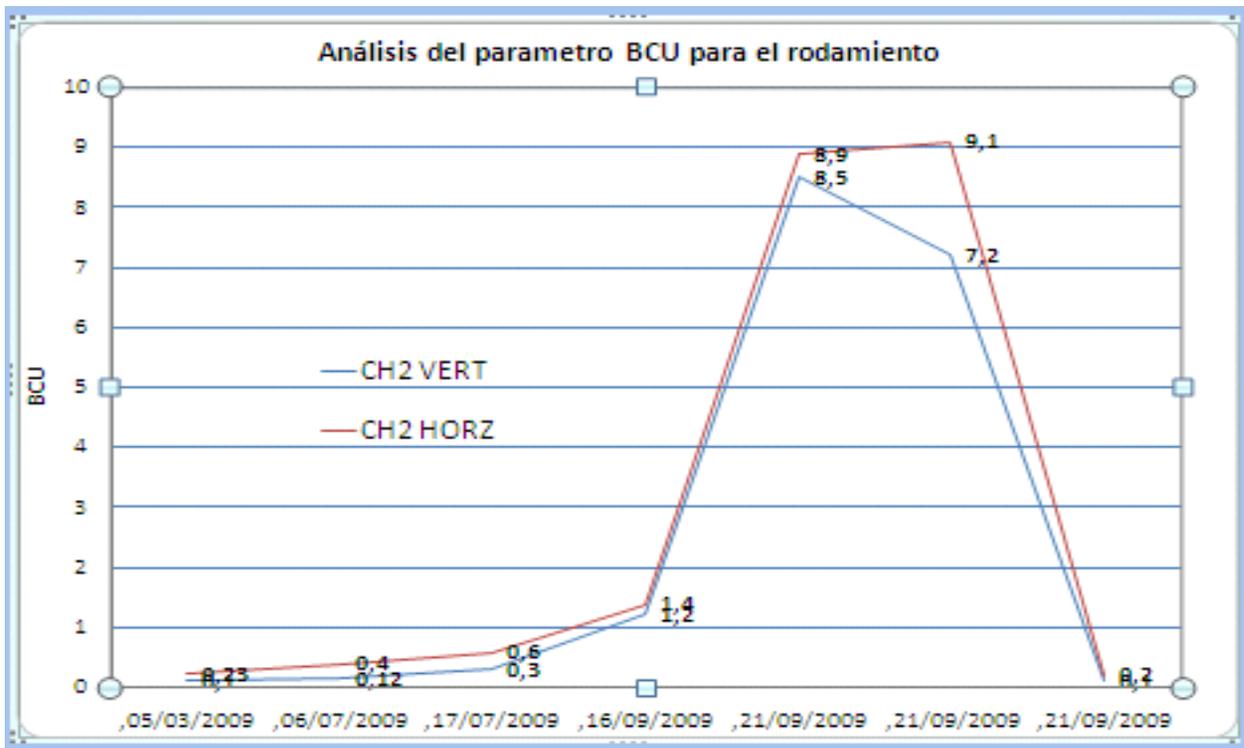


Figura 13: Análisis del BCU Para el mismo ejemplo.

En esta figura No. 13 se muestra el **crecimiento del BCU**, síntoma indicador de posible defecto en rodamiento a la par con la aparición de la falla en el rodamiento.

Comparación de Valores de cálculos según sistema de ecuaciones del capítulo 2 y valores reales según indicadores de posibles fallas en rodamiento. Ver grafica anexo 4. Análisis espectral rodamiento Ch2.

Tabla 10: Valores comparativos de cálculos y mediciones reales

Armónicos	f (Hz) espectro real	Magnitud Vibraciones espectro real	f (Hz) por cálculos
1	62.25	3.33	104,14
2	124.50	1.02	151,53
3	20.00	0.46	51,23

4	186.75	0.40	8,01
5	311.25	0.31	19,67
6	144.50	0.26	39,33
7	214.25	0.24	59
8	137.00	0.23	78.67
9	331.25	0.22	98.33
10	309.00	0.21	118

Otros síntomas analizados asociados al defecto.

- Existencia de ruidos
- Temperatura en rodamiento dentro de lo normado.

Análisis Causa Efecto, determinación de la posible causa raíz de la falla del rodamiento.

Atendiendo a la figura 11: Comportamiento de % de defectos en rodamientos

Efectos por sobrecarga. No son posibles ya que el diseño del rodamiento y sus características no han cambiado, además, el equipo está bien alineado y no presenta desbalances dinámicos entre otros.

Roce: en el análisis espectral realizado durante la puesta en marcha y pruebas de vacío no existe frecuencias de defectos asociadas a este fenómeno. Además las temperaturas del rodamiento no son lo suficientemente altas, así como los niveles de ruido.

Fatiga. Se decide por posible efectos de Fatiga en el rodamiento dado los años de servicio realizar un cambio de rodamiento.

Resumen del defecto. Síntomas de la avería

Se detecta por parte de operación ruidos en el motor, por lo cual se decide buscar una medición de vibraciones.

Como resultado de la misma se detecta posibles defectos en el rodamiento ch2 del motor, por presentar los síntomas que se relacionan a continuación.

- Altas vibraciones en ambas chumaceras del motor, más pronunciadas en el rodamiento ch2 lado cooplíng.
- Aparecen valores altos del BCU como síntoma del defecto del rodamiento.
- En el espectro aparecen armónicos relacionados con la alta frecuencia en el orden de los valores de cálculos relacionados con defectos de alineamiento, excentricidad, defectos en bolas y defectos en pista interior Ver Tabla 10 valores comparativos de frecuencias de defectos 151 Hz, defectos de desalineamiento en 19.67Hz ,59 Hz y 118Hz.
- Ruido alto en la zona del rodamiento CH2.
- Los valores de temperatura ligeramente por encima de lo normado.
- Se denota un nivel de crecimiento de vibraciones más discreto en las chumaceras del ventilador y ch1 del motor.

Medidas tomadas, posible solución

Se decide parar o limitar la unidad para la reparación inmediata del rodamiento ch2 del motor.

De los resultados de comparación de las frecuencias esperadas de defectos, con mediciones reales con posibles defectos

Se observa durante la reparación cambio de rodamiento defectos en la pista interior, tales como: excesivo juego radial y daños en la pista interior.

3.3.2 Ejemplos de aplicación de estas técnicas en defectos de Ventiladores Detectores de Llama unidad 3 y 4. Según resultados de las bases de dato.

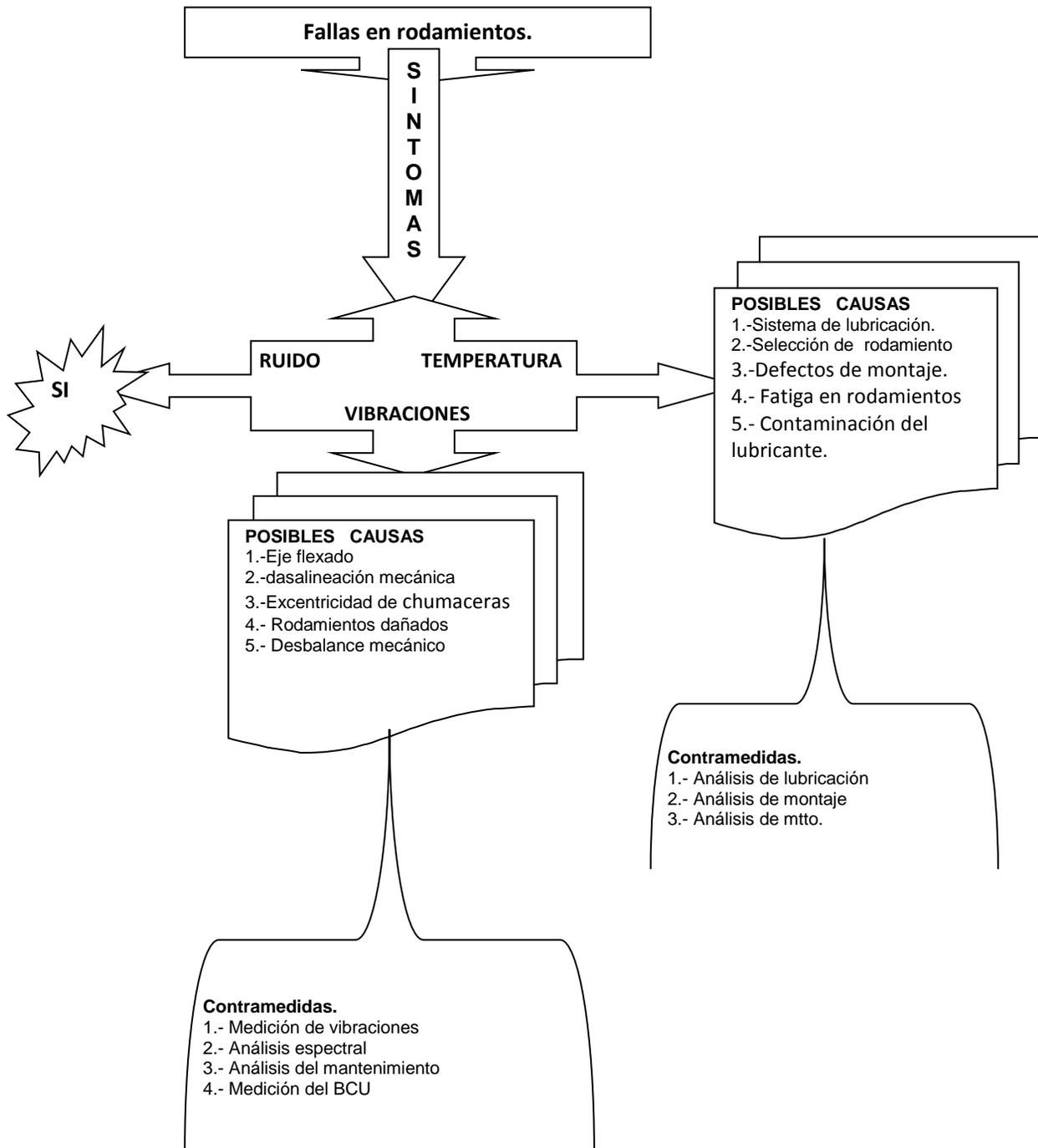


Figura 14: Análisis causa- efecto aplicado a posibles fallas en rodamientos.

Resultados del análisis.

Antecedentes para, los análisis de Ventiladores Detectores de Llama.

Comportamiento según las estadísticas de bases de datos existentes en planta.

Se cita en este ejemplo el análisis de las fallas, más comunes que suceden en los en los rodamientos de los Ventilador Detectores de Llama de planta dentro de ellas los síntomas, posibles causas y modos para la detección. Atendiendo a la Figura 14.

Resultados de comparación de las frecuencias esperadas de defectos, con mediciones reales con posibles defectos. Según análisis del diagrama causa- efecto.

Valores de cálculos según sistema de ecuaciones del capítulo 2 y valores reales según Anexo 5 análisis espectral ch2 Ventilador Detector de Llama.

Tabla 11: Frecuencias de fallas según medición Anexo 5 análisis espectral ch2 Ventilador Detector de Llama

Armónicos	f (Hz) espectro real	Magnitud Vibraciones del espectro real	f (Hz) por cálculos
1	117.75	5.42	177.1
2	176.50	2.84	289.61
3	58.75	2.69	113.9
4	120.00	0.90	22,13
5	179.75	0.62	58,33
6	172.75	0.55	116,67
7	181.50	0.49	175
8	120.75	0.32	233.3

9	235.50	0.27	291.67
10	190.50	0.24	350

Los defectos en estos ventiladores presentan las componentes de causas, que se indican a continuación.

Del sistema de lubricación: Alta contaminación del lubricante dado por la alta contaminación de gases y partículas propia de la zona de trabajo de los ventiladores.

Del sistema mecánico, detectado por análisis vibracional y observaciones del mantenimiento mecánico.

- Excentricidad de los pedestales que hacen que provocan fricción en las pistas rodantes, defecto en pista exterior 177.Hz, defectos en bolas 117.1HZ y efectos de desalineamiento
- Roces interiores de los rodamientos.
- Solturas mecánicas en los aros de rodadura interior de los rodamientos.
- Desbalance mecánico 58.33 Hz.

Se puede resumir, que un 80% de los defectos en estos ventiladores no son propios del rodamiento, sino inducidos por la acción de la tarea mantenimiento y contaminaciones del medio ambiente; que dan lugar a la aparición de defectos interiores del rodamientos, como los que aparecen en los análisis por comparación de falas en rodamiento por frecuencias esperadas según cálculos y los análisis espectrales reales del sistema de monitoreo aplicado.

3.3.3 Ejemplos de aplicación de estas técnicas con miras predictivas, aplicado a los posibles defectos de Reductores de los CAR, por la gran cantidad de rodamientos que tienen y las variadas velocidades en los diferentes sistemas de engrane.

Antecedentes para los análisis de los Calentadores de Aire Regenerativo Comportamiento según las estadísticas de bases de datos existentes en planta.

Se cita en este ejemplo el análisis a tener en cuenta de las posibles causas de fallas en rodamiento, teniendo en cuenta la predicción de defectos en los mismos según los resultados de un ejemplo de mediciones, y los cálculos de las frecuencias esperadas de falla. Así como las una comparación de las avería más comunes que suceden en los en los rodamientos de los reductores del CAR.

Defectos más comunes de los CAR, según la estadística del mantenimiento.

- Desalineamiento
- Fallas en rodamiento del eje motriz.
- Holguras excesivas en los pedestales de alojamiento de los rodamientos.
- Contaminación del lubricante por la alta presencia de gases de caldera.
- Ruidos por desbalance de los cestos CAR.

Resultados de comparación de las frecuencias esperadas de defectos, con mediciones reales con posibles defectos. Para un análisis espectral

Valores de cálculos según sistema de ecuaciones del capítulo 2 y valores_reales según Anexo 6 análisis espectral Ch3 Vertical CAR 3A

Tabla 12: Frecuencias de fallas según medición Anexo 6 análisis espectral ch2 Calentador de Aire Regenerativo.

Armónicos	f (Hz) espectro real	Magnitud Vibraciones del espectro real	f (Hz) por cálculos
1	30.00	0.60	29,75
2	179.50	0.17	178.5
3	59.75	0.16	59.5
4	149.50	0.08	148.75

5	209.25	0.08	52.29
6	187.75	0.07	91.39
7	192.50	0.07	10.08
8	188.25	0.07	0.116
9	189.50	0.07	0.439
10	199.25	0.06	0,542

Observaciones. Posibles defectos predictivos en rodamientos del reductor del CAR atendiendo a los resultados de frecuencias de defectos esperadas. En el eje motriz del reductor, defectos en la pista interior 149.5 HZ, holguras en pista de chumacera exterior 59 HZ, estos resultados nos permiten predecir los posibles defectos del eje motriz a pesar de que el nivel total de vibraciones está en norma.

3.4 instrumentos necesarios para la introducción del mantenimiento predictivo en rodamientos.

El desarrollo de las técnicas de diagnóstico en la ETE Cienfuegos, con su significativa reducción de averías, ha permitido, demostrar que se debe contar con instrumentos como los que relacionamos a continuación .empleadas en la actualidad en planta.

1.- Vibrotest 60. (Ver anexo 7)

- Funciones que realiza.
- Medición de vibraciones Nivel Total en magnitud (Desplazamiento, Velocidad y Aceleración).
- Medición del BCU.
- Espectros de Frecuencia.
- Medición de Fase.
- Balance dinámico.

2.- Vib Expert II. (Ver anexo 8)

- Funciones que realiza.
- Medición de vibraciones Nivel Total en magnitud (Desplazamiento, Velocidad y Aceleración).
- Análisis de orbitas en ejes.
- Análisis de rodamiento y sistemas de engranes.
- Espectros de Frecuencia.
- Medición de Fase.
- Balance dinámico.

Existen otros instrumentos de medición para su aplicación en el análisis de diagnóstico, los cuales pueden ser consultados en el anexo **(ver anexo 9)**. Además de la aplicación de instrumentos de primer nivel. Se aplican otras técnicas de los 5 sentidos como lo son: la escucha, el tacto, el olfato, la vista, el olor, cumplimentando todo ello el diagnóstico de estado.

3.5 Sistema Organizativo para el Diagnóstico y Monitoreo de Estado aplicado durante la implantación del Sistema de Mantenimiento por diagnóstico en rodamientos

La característica principal de todas las formas organizativas avanzadas de mantenimiento es que se basan en el conocimiento del estado técnico real de las máquinas objeto de análisis. Por ello la aplicación de un sistema de muestreo de datos como el que se presenta a continuación en la tabla que está en el anexo 10 responde a las exigencias actuales durante la implantación del Mantenimiento por Diagnóstico en rodamientos.

En el anexo 10. Sistema de monitoreo por vibraciones , se muestra el Sistema Organizativo, para los equipos de Categoría A, B y C, que permite el muestreo de datos por parte de las diferentes áreas de la central, de manera tal que cada forma

y técnica aplicada para la adquisición de la información necesaria convergen en un solo análisis. Este tipo de organización permite establecer la dinámica del parámetro de síntoma de estado y su correlación con las posibles fallas en los dispositivos, con el propósito de evitar las averías.

Con un sistema de monitoreo aplicado como el que se muestra anteriormente, se logran resultados como los alcanzados en los ejemplos VTF, VDELL, estudiados en este trabajo.

3.6. Resultados Técnicos de la aplicación del Sistema de Mantenimiento por Diagnóstico Según Estados a equipos Categoría B.

Es evidente que el criterio de ahorro a partir de una evaluación de la rentabilidad de una inversión, es el que nos da un criterio certero de la efectividad de la aplicación del diagnóstico, para ello fue necesario realizar un inventario en términos de costo por reducción de averías, antes y después de la implantación del mismo de los métodos de análisis, resultados que se sintetizan durante el desarrollo de este epígrafe

La presente evaluación técnica económica, se realiza a partir de la comparación entre la aplicación del Mantenimiento Predictivo en equipos de planta en general entre los el Mantenimiento Predictivo entre el año 2012 y 2013, siendo similares en lo referido a cantidades de mediciones realizadas en el sistema de monitoreo.

3.6.1 Resultados de la Valoración técnica

En las figuras (15), a continuación se muestran los resultados de la cantidad de ensayos de diagnóstico, realizado entre los años 2012 y 2013, de manera que se puede comparar, como con la aplicación de técnicas como las descritas en este estudio se pueden llegar a reducir las averías en los sistemas en planta, así como

la predicción a partir de las frecuencias de fallas en rodamientos, lo que permite reducir la cantidad de defectos no predecibles por el grupo de diagnóstico teniendo en cuenta que un alto más de un 100% de los equipos de planta tienen rodamientos, y más de un 70% de las fallas en motores obedecen a defectos en rodamientos.

En la figura a continuación, se muestran los resultados de las desviaciones de parámetros de estado relacionadas con el diagnóstico de estado, según el monitores en bases de datos para el año 2013, su comparación con resultados similares al 2012. Esto nos permite realizar una valoración comparativa de la efectividad del de la predicción de fallas en los equipos.

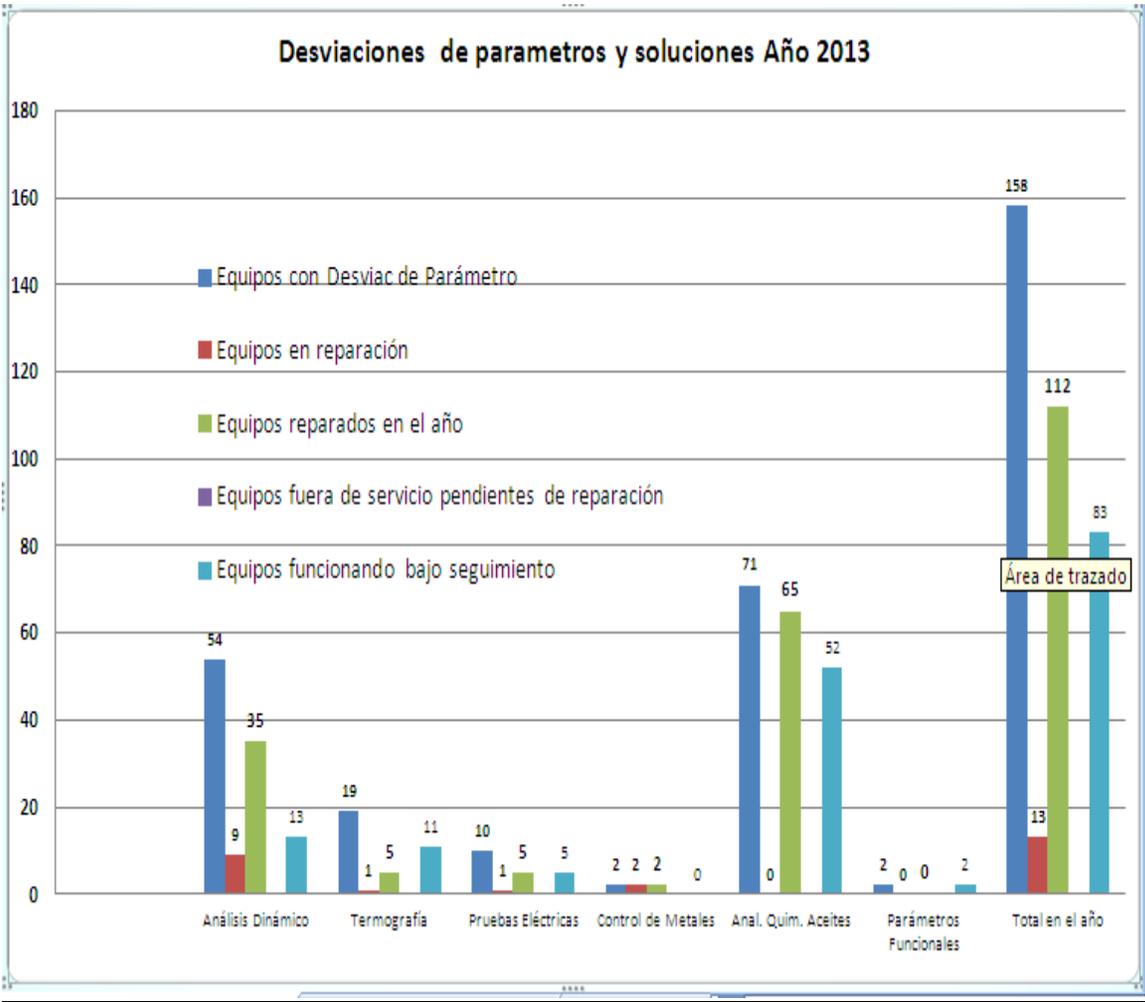


Figura 15: Comportamiento de las desviaciones de parámetros año 2013.

En la figura 16 se establecen los valores resultados de manera comparativa entre el 2012 y el 2013. De lo cual podemos decir:

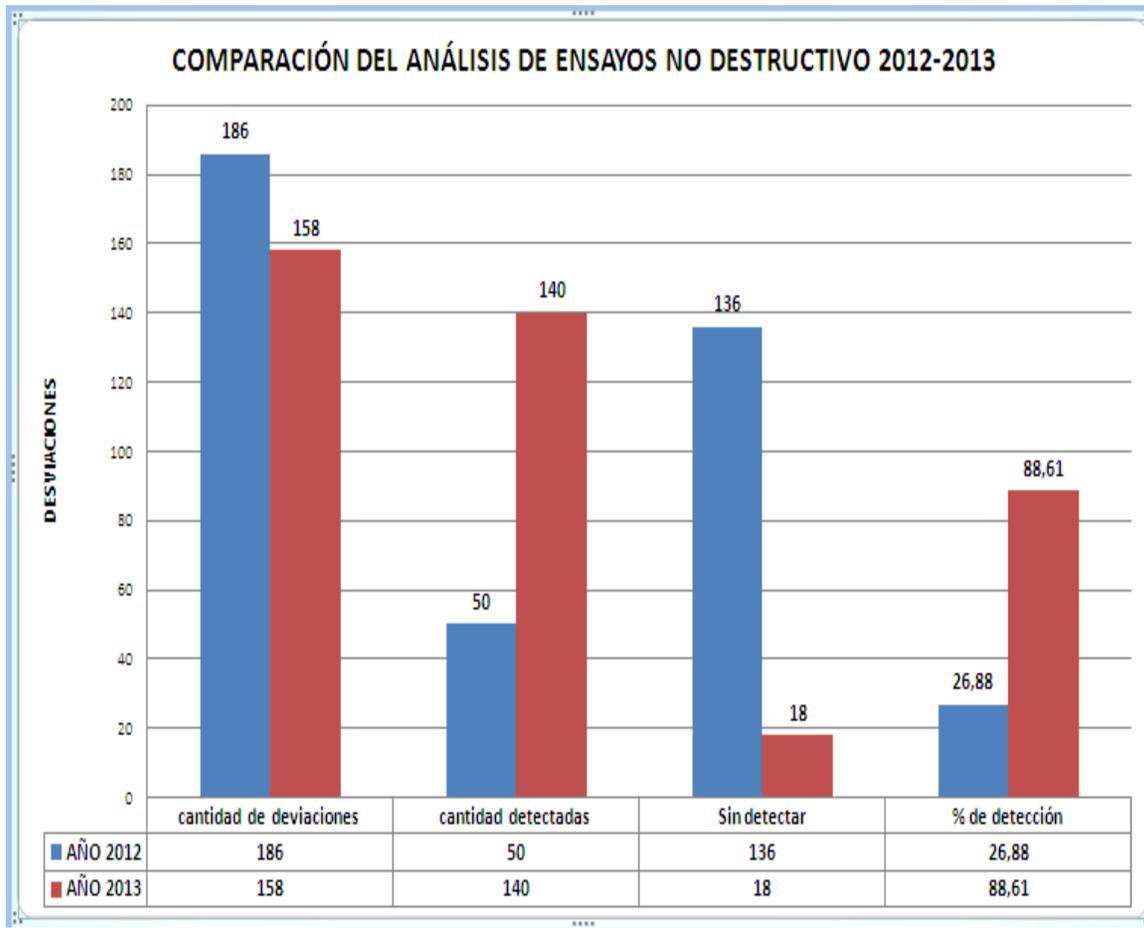


Figura 16: comparación del comportamiento de las desviaciones de parámetros entre los años 2012 y 2013.

Como resultado del trabajo técnico realizado asociado a la predicción de averías en rodamientos que alcanzan un 70% de las existentes en planta en lo fundamental motores:

- Las cantidades de desviaciones fueron bastante similares.
- Las cantidades detectadas en el 2013 fueron casi 3 veces las del año anterior que significan un 88.61% de las detecciones del año 2012.
- Esto significa poder tomar acciones planificadas en las fallas que de una forma u otra contribuyen al ahorro de recursos tanto por mano de obra como por de recursos materiales.

Este resultado indica una reducción de las averías imprevistas símbolo de averías catastróficas en el argón de equipos en explotación en producciones continuas como las que se realizan en la entidad.

3.6.2 Efecto Económico por aproximación.

La valoración económica de este trabajo tiene como precedentes los cálculos realizados en el trabajo. Factibilidad Técnico Económica de la Introducción del Sistema MBC en Equipos Fotodinámicos.

La cual contiene cálculos reales en el orden de los 133397.422 pesos por años, ganados por la reducción de averías en general en el orden de un 54.97%, para un período comparativo 1989-1995, sin técnicas e instrumentos de diagnóstico, con las del período del 1996 al 2001, con instrumentos de un segundo nivel.

Si comparamos el nivel de instrumentación existente de un primer nivel, con la experiencia de trabajo adquirida a partir de la etapa 2002, podemos estimar que para el caso de las averías en rodamientos con las técnicas de predicción de fallas aplicadas a todos los sistemas de planta y teniendo en cuenta los resultados comparativos entre el 2012 y el 2014, se puede lograr reducir estas pérdidas en mas de un 50%, que indicaría una ganancia en el orden de los **66698.711** por encima de los resultados del 2001.

Conclusiones parciales del Capítulo III

1.- Como resultados de la aplicación del análisis de rodamiento en equipos fundamentales podemos citar.

- Los cambios elementales de rodamientos en equipos categoría B como los VTF y VRG entre otros, a partir de la planificación del MPP, han tenido variaciones en su sustitución al MPD (mantenimiento en Preventivo por diagnóstico) que ha permitido alargar la vida útil y explotación de los rodamientos en cuestiones de más de 8 años.
- Los planes de mantenimiento en la mayoría de los motores de planta sufren variaciones continuamente sobre la base del MPD, que favorece una mayor explotación de los equipos y en otros casos evita la avería inesperada por fallas en rodamiento.
- El balance y alineamiento como trabajo ya consagrado con sus técnicas actualizadas e instrumentos de punta, a permitido alargar la vida útil de los rodamientos, eliminando la posible avería por sobrecarga en rodamientos.

2. Los resultados positivos de una saludable lubricación evita la avería más común en rodamientos, detectable por el análisis BCU, y aplicación de la técnica espectrales y con la introducción del nuevo método para análisis de frecuencias esperadas de fallas en rodamientos.

3. El trabajo práctico con los ejemplos de cálculos reales a partir de las mediciones y cálculos teóricos, constituye una herramienta que permite con gran rapidez llegar a determinar las posibles causas raíz del estado de funcionamiento de los equipos que sus chumaceras son de rodamiento.

4. Este estudio con los ejemplos citados contiene de las partes fundamentales tanto teórico como práctico que se deben conocer para realizar estudios en sistemas con chumaceras de rodamiento.

5. El análisis económico de la efectividad de la Introducción del Sistema de Análisis espectral con frecuencias esperadas permite predecir resultados económicos en el orden de los **66698.711** por encima de los resultados del 2001.

Conclusiones generales

Como resultados del estudio Factibilidad Técnico-Económico para la Introducción del Diagnóstico en Rodamientos. Se pueden destacar:

1. Un estudio elemental de los conceptos de mantenimiento que están relacionados estrechamente con los criterios de tipos de mantenimiento objetivo central de la central termoeléctrica.
2. Los Gráficos de Control que permiten valorar el comportamiento de una variable, en función de ciertos límites establecidos, además resultan de gran información durante la aplicación de los diagramas Causa-Efecto.
3. El mantenimiento y tipos de fallos relaciona la capacidad operativa de trabajo de equipo u sistemas que operan con rodamientos.
4. El diagrama Causa – Efecto, que como técnica gráfica viabiliza la realización de análisis Causa – Raíz de los posibles defectos que acompañan las variaciones de los parámetros síntomas, que aparecen como efectos de de posibles fallas en los sistemas con rodamientos.
5. Los conceptos de vibraciones y análisis espectral, como técnica aplicada en la actualidad en la ETE Cienfuegos, nos permite ubicar en los diagnósticos la predicción del estado de los equipos.
6. Un análisis atendiendo a la categorización de los equipos, que permite aplicar el método objetivo de estudio aquellos equipos que tienen mayor peso en la indisponibilidad de la central.
7. Un estudio Científico-Técnico de los problemas asociados con el adecuado desempeño de los equipos, particularmente para parámetros de estado que se deterioran con el tiempo y provocan fallas en los Rodamientos.
8. La utilización de herramientas informáticas de diagnóstico, en el estudio de las variaciones dinámicas de los parámetros de estado asociados a defectos internos de los rodamientos, que nos dan una información predictiva de las fallas.
9. Introducción de nuevos datos en el sistema organizado de monitoreo así como en las bases de datos existentes.

Como resultados del estudio Técnico-Económico de la introducción del Sistema a los equipos de planta de Categoría "B" se pueden destacar:

1. La introducción de indicadores técnicos medibles a partir de la instrumentación de primer nivel, que permiten evaluar y controlar la incidencia de parámetros del rodamiento con relación a su deformación y desgastes.
2. Los cambios elementales de rodamientos en equipos categoría B como los VTF y VRG entre otros, a partir de la planificación del MPP, han tenido variaciones en su sustitución al MPD (mantenimiento en Preventivo por diagnóstico) que ha permitido alargar la vida útil y explotación de los rodamientos en cuestiones de más de 8 años.
3. Variaciones en los planes de mantenimiento en la mayoría de los motores de planta sobre la base del MPD, que favorece un mayor tiempo de vida útil de los rodamientos.
4. El balance y alineamiento como trabajo consagrado con sus técnicas actualizadas e instrumentos de punta, ha permitido alargar la vida útil de los rodamientos, eliminando la posible avería por sobrecarga en rodamientos.
5. El trabajo práctico para los ejemplos de cálculos reales a partir de las mediciones y cálculos teóricos, constituye una herramienta que permite con gran rapidez llegar a determinar las posibles causas raíz del fallo en equipos que sus chumaceras son de rodamiento.
6. El análisis económico de la efectividad de la Introducción del Sistema de Análisis espectral con frecuencias esperadas permite predecir resultados económicos en el orden de los **66698. 711** por encima de los resultados del 2001

RECOMENDACIONES.

1. Hacer extensivo el estudio al resto de los equipos de planta, de manera que se puedan incluir en las bases de datos, los parámetros de estado a controlar para la predicción de fallos en la gran gama de rodamientos existentes en planta.
2. Mantener la unificación de toda la información, que incluyen otras especialidades como metales, lubricación, eléctrica, que permitan enriquecer las ideas introducidas en este trabajo.
3. Realizar estudios estadísticos de defectos en planta relacionados con las fallas en rodamientos, para determinar económicamente las pérdidas con mayor precisión asociadas e ello.

Bibliografía

- A-MAQ. (2005, Enero). *Análisis de Maquinaria*. Recuperado el Abril 11, 2014, de <http://www.a-maq.com>
- Bruel, K. (1984). *Mantenimiento Predictivo*. La Habana.
- Castro, D. L. (1996). *Metodología y Diseño para la Implantación del Sistema Alternativo de Mantenimiento a Equipos Rotatorios en la CTE*. Cienfuegos.
- Corrales, A. (1993). *Reflexión sobre el Mantenimiento en las Industrias Modernas*. España.
- Fernández, S. C. (2004). *Factibilidad Técnico-Económica de la Introducción del Sistema del MBC en Equipos Rotatorios*.
- Fernández, S. G. (1998). *Metodología para la Introducción del Diagnóstico Integrar para Centrales y Sub-Estaciones Eléctricas*.
- J., R. (2001). *Calidad del Proceso y el Análisis de Causa-Raíz*.
- Jover, A. (1994). *Contribución del mantenimiento al aumento de la capacidad de producción. Mantenimiento*. España.
- Kjaer, B. &. (2001). *Guía de interpretación de espectros*. España Madrid.
- Kjaer, B. &. (1984). *Mantenimiento Predictivo*. La Habana.
- Kjaer, S. B. *Tabla de interpretación de espectros*. España.
- Knezevic, J. (1996). *Mantenimiento*. Madrid: Publicaciones de Ingeniería de Sistemas Vol 10.
- Marín, E. P. (1997). *Ingeniería de las Vibraciones en el Diagnóstico de Máquinas Rotatorias*. Vibrosoft.
- Mendoza, R. H. (2001). *Análisis de Fallas en Rodamientos de Motores Eléctricos, una Aplicación del Análisis Causa-Raíz*.
- Misa, F. M. (1994). *El Mantenimiento Predictivo en la Industria*.
- Molina, A. L. (2011). *Factibilidad Técnico-Económica para la Introducción del Mantenimiento por Diagnóstico en Calderas de la ETE*. Cienfuegos.
- Morrow, C. L. (1973). *Manual de Mantenimiento Industrial*. Mexico.
- NSK Bearing Doctor. (2004). *Diagnóstico Rapido de Fallas en Rodamientos*.
- Piovan, M. T. (2004). *Rodamientos. Descripción y Selección.*, (pág. 2 3 4 5).

Roberto, J. (2001). *Calidad del Proceso y el Análisis de Causa-Raíz*.

Royo, J. A. (2014, Marzo). *Análisis de Vibraciones e Interpretación de Datos*. Obtenido de <http://www.google.com>

Schenck, C. (1995). *Machine Diagnosis Field Balancing Shaft Aligument*. D-64273 Parmstadt.

Anexos

Guía de anexos

Anexo 1: Tipos de rodamiento

Anexo 2: Clasificación de Equipos por Categorías, A, B, C

Anexo 3: Sistema del reductor del CAR con sus accesorios.

Anexo 4: Análisis espectral ch2 del Ventilador Tiro Forzado 4A

Anexo 5: Espectro real Detector de Llama.

Anexo 6: Gráfica de análisis espectral del CAR 3A Ch3 dirección Vertical.

Anexo 7: Instrumento de medición Vibrotest 60

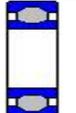
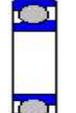
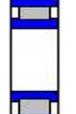
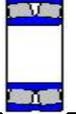
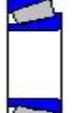
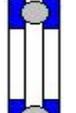
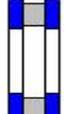
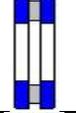
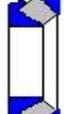
Anexo 8: Instrumento de medición: **Vib Expert II.**

Anexo 9: Otros instrumentos de medición utilizados en el análisis de diagnóstico

Anexo 10: Plan de monitoreo periódico básico para el mantenimiento predictivo (Monitoreo subjetivo y objetivo).

Anexo 11: Guía metodológica aplicada para la clasificación de equipos

Anexo 1

Tipos de rodamiento	Figura
1-Cojinetes de Bolas de Ranura profunda	
2-Cojinetes de Bolas Autoalineables	
3- Cojinetes de Bolas de Contacto Angular	
4- Cojinetes de Rolletes Cilíndricos	
5- Cojinetes de Rolletes de Aguja	
6- Cojinetes de Rolletes esférico	
7- Cojinetes de Rolletes Cónicos	
8- Cojinetes de bola de Empuje	
9- Cojinetes de Rolletes Cilíndricos de Empuje	
10- Cojinetes de Rolletes de Aguja de Empuje	
11- Cojinetes de Rolletes esférico de Empuje	
12- Cojinetes de Bolas en Y	

Anexo 2. Clasificación de Equipos por Categorías, A, B, C

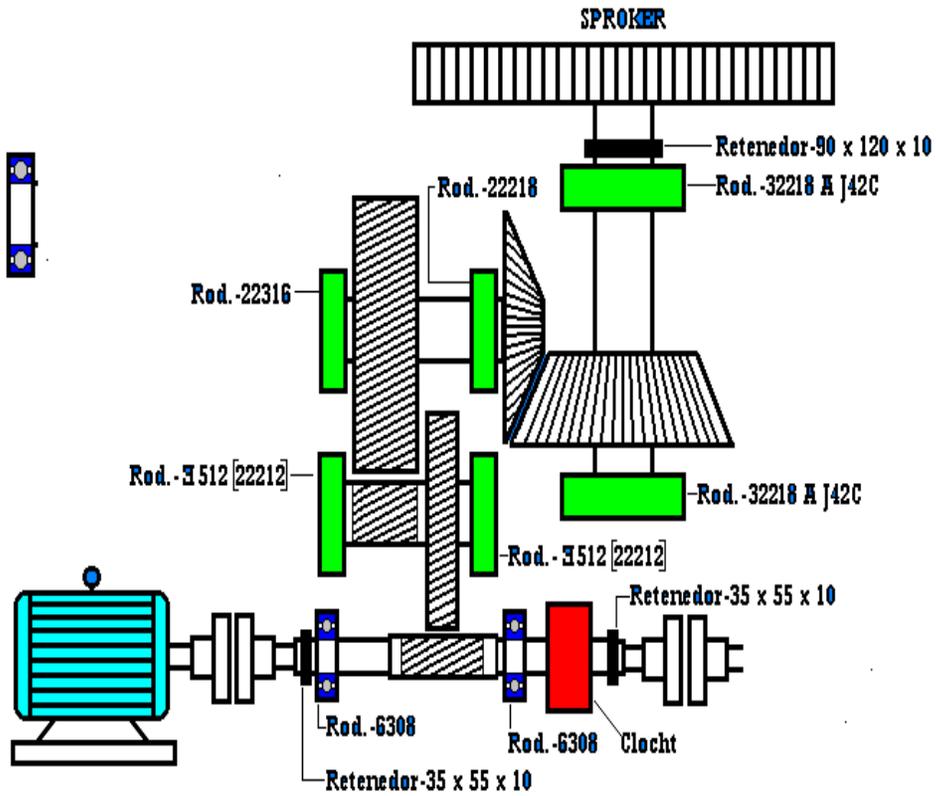
No	Equipos por sistemas del proceso productivo	Potencia (KW)	r.p.m	Tipos de clasificación	Aspectos de clasificación											Total de puntos	Clasificación final del equipo	
					1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11			
	CALDERA JAPONESA																	
	Ventilador de tiro forzado IIIA	1100	1180	A B C			.	.	.				.				4 7	B*
17	Ventilador de tiro forzado IIIB	1100	1180	A B C			.	.	.				.				4 7	B*
18	Ventilador recirculador de gases	300	1175	A B C	.		.										2 9	B*
19	Calentador de aire regenerativo IIIA	5.5	1130	A B C	.		.	.					.				4 6 1	B*
20	Calentador de aire regenerativo IIIB	5.5	1130	A B C	.		.	.					.				4 6 1	B*
21	Ventilador enf. detec. llama IIIA	7.5	3500	A B C			.										1 4 6	C*

22	Ventilador enf. detec. llama IIIB	7.5	3500	A				.									1	C*
				B	.		.			.				.		4
				C	.	.			.	.	.	.	.	.	.	6
23	Bomba de petróleo IIIA	75	1750	A			.	.									2	B*
				B	.	.			.	.	.	.	.	.	.	8
				C	.	.			.						.	6
24	Bomba de petróleo IIIB	75	1750	A			.	.									2	B*
				B	.	.			.	.	.	.	.	.	.	8
				C	.	.			.						.	6

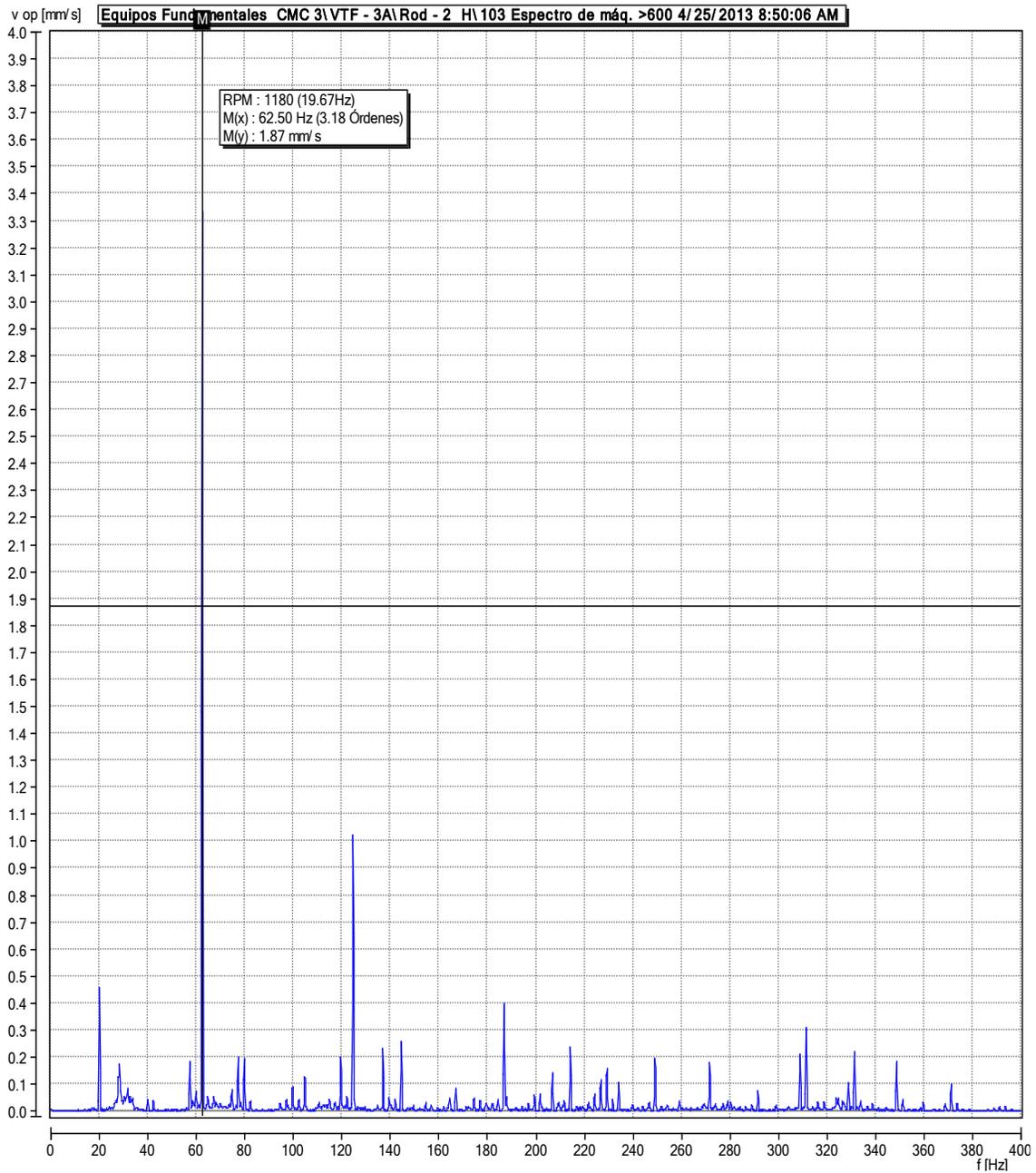
No	Equipos por sistemas del proceso productivo	Potencia (KW)	r.p.m	Tipos de clasificación	Aspectos de clasificación											Total de puntos	Clasificación final del equipo	
					1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11			
68	Bomba de alimentar IIIB	1850	3570	A							5	B*
				B	.	.					.		.	.	.	6
69	Bomba de alimentar	1850	3570	A							5	B*
				B	.	.					.		.	.	.	6
70	Bomba circulación IIIA	450	440	A			.	.	.								3	B*
				B	.	.										8		
				C	.	.			.	.	.	.	.	.	.	8
71	Bomba circulación IIIB	450	440	A			.	.	.								3	B*
				B	.	.					.	.	.	.	.	8
				C	.	.			.	.	.	.	.	.	.	8
72	Bomba condensado IIIA	330	1775	A			.	.									2	B*
				B	.	.			.	.	.	.	.	.	.	9
				C	.	.			.	.	.	.	.	.	.	9

73	Bomba condensado IIIB	330	1775	A															2	B*		
				B																		9
				C	.	.																
74	Bomba enfriamiento IIIA	132	1740	A															2	B*		
				B																	7	
				C	.	.															2	
75	Bomba enfriamiento IIIB	132	1740	A															2	B*		
				B																	7	
				C	.	.															2	
76	Bomba de transferencia de condensado	22	3510	A	.														1	C		
				B																	10	
				C	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
77	Bomba Bouster de aceite	-	-	A																-		
				B	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		-	
				C																		
78	Bomba principal de aceite	110	3520	A															4	C*		
				B																	7	
				C	.	.	.	.										
79	Bomba auxiliar corriente alterna	22	3610	A															4	C*		
				B																	7	
				C	.	.	.	.										

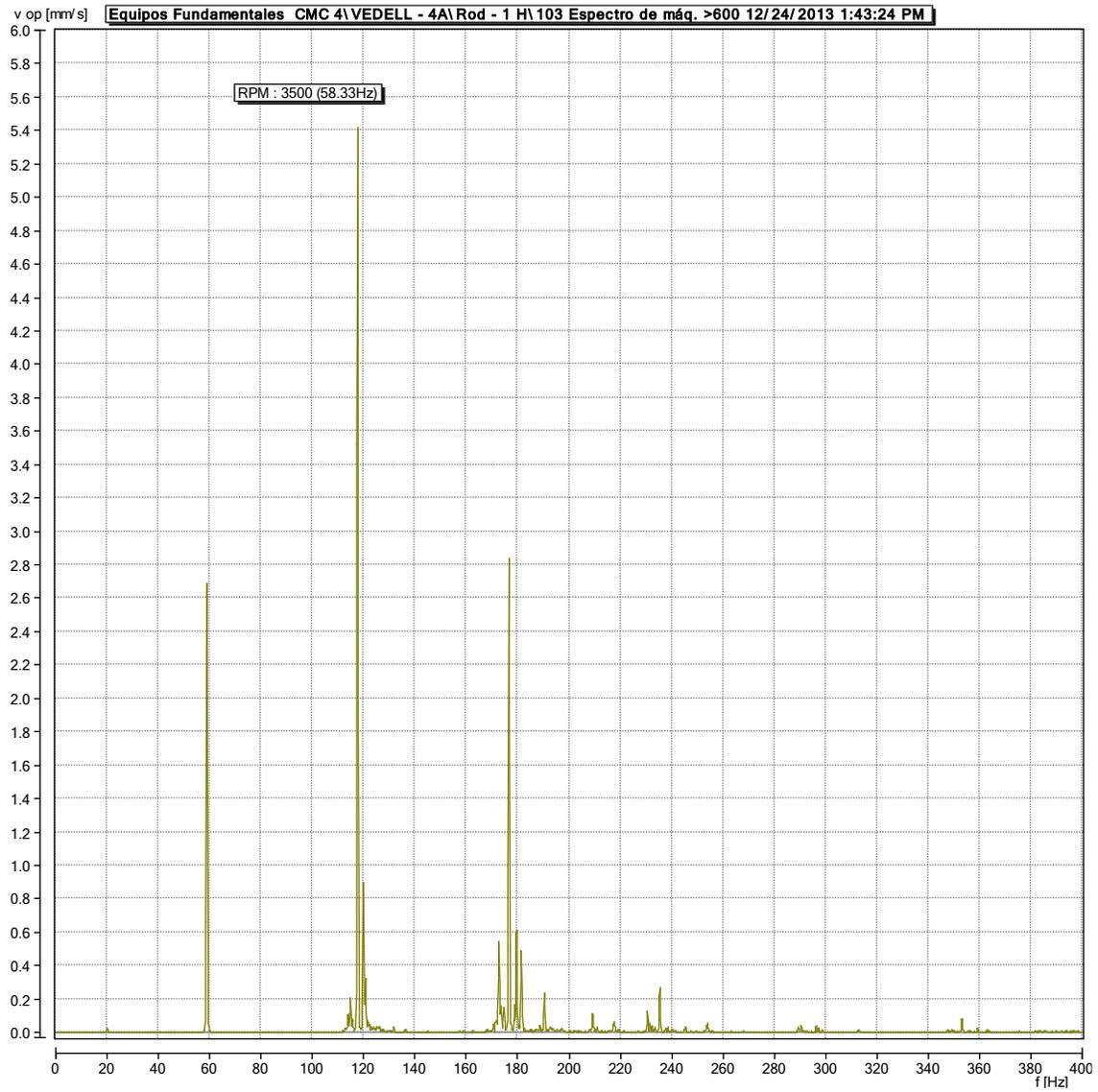
Anexo 3: Sistema del reductor del CAR con sus accesorios.



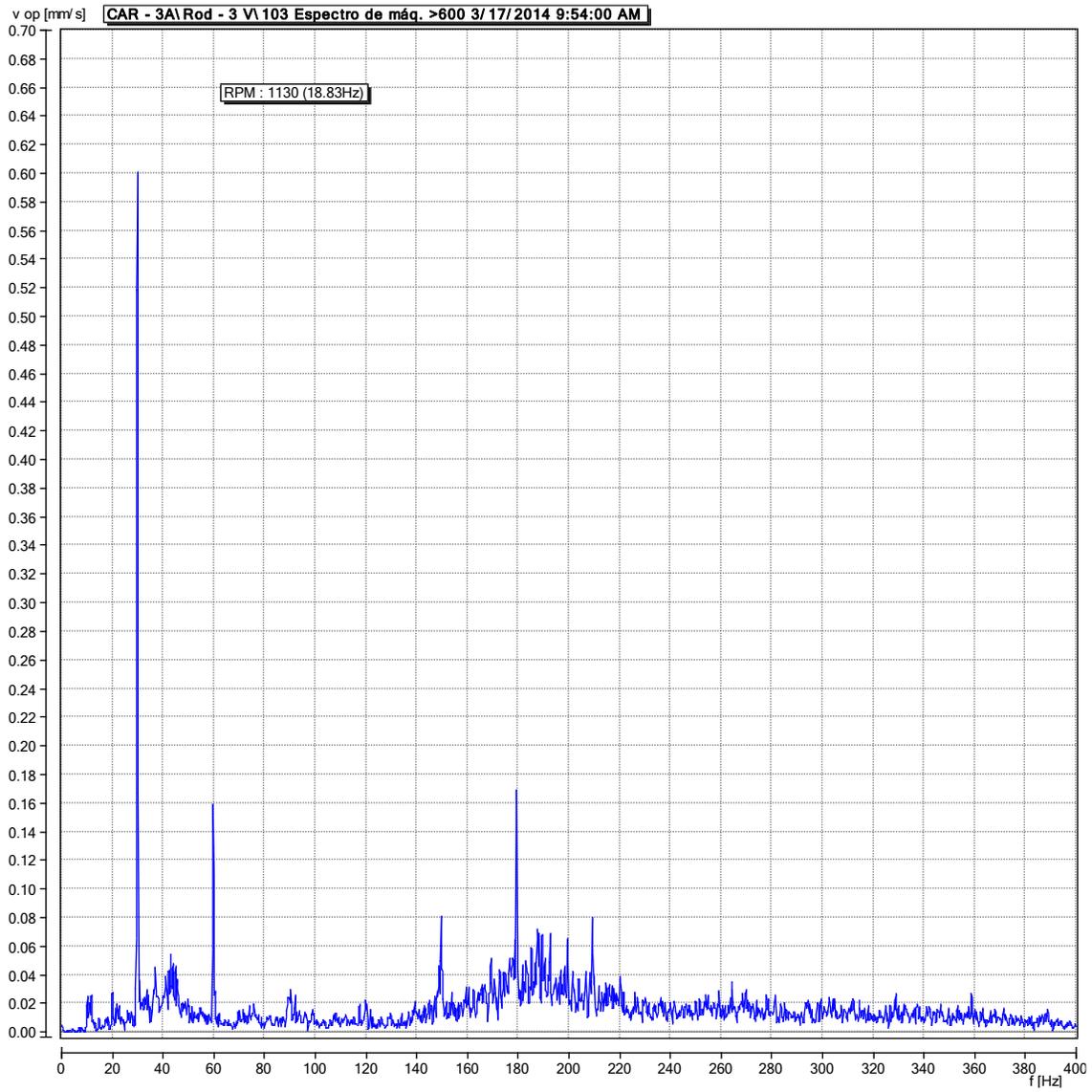
Anexo 4: Análisis espectral ch2 del Ventilador Tiro Forzado 4A



Anexo 5: Espectro real Detector de Llama.



Anexo 6: Gráfica de análisis espectral del CAR 3A Ch3 dirección Vertical.



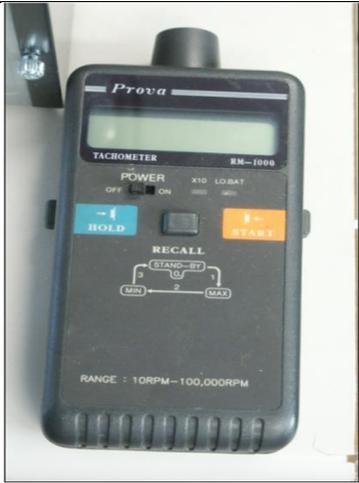
Anexo 7: Instrumento de medición Vibrotest 60



Anexo 8: Instrumento de medición: Vib Expert II.



Anexo 9: Otros instrumentos de medición utilizados en el análisis de diagnóstico

Cámara termográfica	Medidor de ruido	Medidor de velocidad
		
<p>Aplicaciones.</p> <p>Medición de perfiles de temperatura</p>	<p>Aplicaciones.</p> <p>Medición de ruido</p>	<p>Aplicaciones.</p> <p>Medición de velocidad</p>

Anexo 10: Plan de monitoreo periódico básico para el mantenimiento predictivo (Monitoreo subjetivo y objetivo).

N o.	Equipos por sistemas del proceso productivo	Clasificación del equipo	Medición Periódicas Vibraciones, chequeo de parámetros de estado y análisis espectral					Inspecciones (Empleo de los 5 sentidos) Toma de parámetros.		
			Me s	Bi- mens ual	Tri- Mens ual	Semes tre	Anu al	sema nal	Mens ual	Por Análi sis causa s Efect o
	Unidad Japonesa III									
1	.Ventilador de tiro forzado III A	B	X					X		
2	Ventilador de tiro forzado III B	B	X					X		
3	Ventilador recirculador de gases III	B	X					X		
4	Calentador de aire regenerativo III A	B	X					X		
5	Calentador de aire regenerativo III B	B	X					X		
6	Ventilador enfto. detec. llama III A	C		X					X	
7	Ventilador enfto. detec. llama III B	C		X					X	
8	Bomba de petróleo III A	B	X					X		
9	Bomba de petróleo III B	B	X					X		
10	Bomba de gas oil III A	C				X				X
11	Bomba de gas oil III B	C				X				X
12	Bomba de	C			X				X	

	agua desmineralizada III A								
13	Bomba de agua desmineralizada IIIB	C			X			X	
14	Bomba dosificadora hidracina III A	C					X		X
15	Bomba dosificadora hidracina III B	C					X		X
16	Bomba dosificadora fosfato III A	C					X		X
17	Bomba dosificadora fosfato III B	C					X		X
18	Bomba ácido sulfúrico	C				X		X	
19	Bomba sosa #1	C				X		X	
20	Agitador TK fosfato III	C					X		X
21	Bomba de alimentar III A	B	X					X	
22	Bomba de alimentar III B	B	X					X	
23	Bomba de alimentar III C	B	X					X	
24	TURBINA IV	A	X					X	
25	Bomba circulación III A	B	X					X	
26	Bomba circulación III B	B	X					X	
27	Bomba condensado III A	B	X					X	
28	Bomba condensado	B	X					X	

	III B									
29	Bomba enfriamient o III A	B		X				X		
30	Bomba enfriamient o III B	B		X				X		
	Totales		16	4	2	4	5	17	6	7