



MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR

FACULTAD DE METALURGIA Y ELECTROMECAÁNICA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

**TRABAJO DE DIPLOMA EN OPCIÓN AL TÍTULO DE
INGENIERO MECÁNICO**

**PROPUESTA DE UN SISTEMA DE MANTENIMIENTO POR
DIAGNÓSTICO A LAS BOMBAS DE CIRCULACIÓN 2VC01 Y
2VC11 DE LA TERMOELÉCTRICA: LIDIO RAMÓN PÉREZ**

Autor: Yenny Sánchez Aguilar

Tutor: Ms. C. Jorge Luis Reyes de la Cruz

Moa, 2016

DECLARACIÓN DE AUTOR

Yo: Yenny Sánchez Aguilar

Autor de este trabajo de diploma certifico su propiedad a favor del Instituto Superior Minero Metalúrgico “Dr. Antonio Núñez Jiménez”, el cual podrá hacer uso del mismo con la finalidad que estime conveniente.

Autor: Yenny Sánchez Aguilar

Tutor: Ms. C. Jorge Luis Reyes de la Cruz

Firma: _____

Firma: _____

AGRADECIMIENTOS

Mis primeros agradecimientos son para mis compañeros de clases, que significaron mi mayor fuente de apoyo moral en los cinco años de universidad.

Agradezco también a los profesores del Departamento de Mecánica del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, en especial a mi tutor Jorge Luis Reyes.

Al personal de los departamentos de Capacitación, Dirección Técnica y Diagnóstico de la Empresa Termoeléctrica Lidio Ramón Pérez.

A mis compañeros de cuarto José Carlos y Yosmani Almira.

Al gobierno cubano por permitir que me formara con total gratuidad.

Y un eterno agradecimiento a quien significó mi segunda madre en este período y de quien aprendí tanto, mi tutora Rosalba Olivero Mondelo.

DEDICATORIA

Dedico el presente trabajo, el cual ha sido fruto de todo mi esfuerzo, a toda mi familia que espero constituir un orgullo para todos ellos.

A mis sobrinitas que vienen en camino

Y a las personas que han sido imprescindibles en mi vida: mi abuelita querida, mi madre inigualable, y a quien ha significado absolutamente todo para mí: mi hermano Yulexi Texidó.

RESUMEN

En el presente trabajo se propone un sistema de Mantenimiento por Diagnóstico a las bombas de circulación 2VC01 y 2VC11 de la Empresa Termoeléctrica Lidio Ramón Pérez, debido a que el Mantenimiento Preventivo Planificado vigente no garantiza el correcto funcionamiento de estos equipos. Se realiza un estudio de relación de los valores globales de vibraciones y la ocurrencia de los modos de falla en un período de 14 meses, lo que permitió la caracterización del objeto de estudio mediante patrones vibracionales de referencia teniendo en cuenta la frecuencia fundamental y la de paso de aspa de 7,41 Hz y 22,25 Hz respectivamente.

La instauración del sistema de mantenimiento propuesto significa un ahorro de 12664 MN en materia de acciones a realizar, mientras que la implementación del sistema de monitoreo on – line posee un costo de 462042 MN, representando tan solo un 2,43 % del costo total por una avería de 14 días, justificando notablemente su implementación.

Los factores de riesgo fundamentales de las bombas de circulación están representados por las vibraciones y por el ruido, por lo que se establecen medidas de prevención en contra de los efectos dañinos que provocan estos fenómenos.

ABSTRACT

In the present work intends a system of Maintenance for Diagnostic to the pumps of circulation 2VC01 and 2VC11 of the Thermoelectric Lidio Ramón Pérez, due the actual Planned Preventive Maintenance doesn't guarantee the correct operation of these teams. It is carried a study of relationship of the global values of vibrations and the fault mode is occurrence in a period of 14 months, what allowed the characterization of the study object by means of patron reference vibration keeping in mind the fundamental frequency and the of cross step of 7,41 Hz and 22,25 Hz respectively.

The system of proposed maintenance means a saving of 12664 MN due to actions to carry out, while the implementation of the monitoring system on – line possesses a cost of 462042 MN, representing a 2,43% of the total cost for a mishap of 14 days, justifying its implementation notably.

The fundamental factors of risk of the circulation pumps are represented by the vibrations and for the noise, for what measures of prevention settle down against the harmful effects that cause these phenomena.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO.....	5
1.1. Introducción	5
1.2. Bombas axiales.	5
1.3. Generalidades sobre el mantenimiento.	6
1.3.1. Evolución del mantenimiento.	7
1.3.2. Herramientas del Mantenimiento.....	9
1.3.3. Programa de Mantenimiento por Diagnóstico.	13
1.3.4. Técnicas de Diagnóstico.	16
1.3.5. Análisis de Vibraciones.	17
1.4. Disponibilidad.	18
1.4.1. Opciones de Disponibilidad.	20
1.5. Conclusiones del Capítulo.	22
CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS	23
2.1. Introducción	23
2.2. Características de las bombas 2VC01 y 2VC11	23
2.3. Metodologías de las herramientas del mantenimiento	25
2.3.1. Análisis de Criticidad.....	25
2.3.2. Matriz de Parámetros Óptimos y Diagrama de Pareto.....	28
2.3.3. Diagrama causa – efecto de Ishikawa.	29
2.3.4. Modos de fallos y análisis de causas y efectos (FMECA).	30
2.4. Cálculo de la Disponibilidad.....	31

2.4.1. Cálculo de la Disponibilidad Genérica.	33
2.4.2. Cálculo de la Disponibilidad Inherente.....	34
2.4.3. Cálculo de la Disponibilidad Alcanzada.	35
2.4.4. Cálculo de la Disponibilidad Operacional.	36
2.5. Procedimiento de medición y caracterización de las bombas de circulación.	36
2.5.1. Instrumento de medición.....	37
2.5.2. Puntos de medición	37
2.5.3. Condiciones de operación	38
2.6. Requerimientos para el monitoreo on – line.	38
2.6.1. Posición de los transductores.	39
2.7. Consideraciones para realizar la valoración económica y ambiental.	40
2.8. Conclusiones del Capítulo.	42
CAPÍTULO 3: ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.....	42
3.1. Introducción	42
3.2. Resultados de las Herramientas del Mantenimiento.	42
3.2.1. Resultados del análisis de Criticidad	42
3.2.2. Resultados del Diagrama de Pareto.	44
3.2.3. Resultados del Diagrama de Ishikawa.	46
3.2.4. Resultados de los Modos de fallos y análisis de causas y efectos (FMECA).	48
3.3. Resultados del cálculo de las Disponibilidades.	49
3.4. Caracterización de las bombas de circulación 2VC01 y 2VC11.	50
3.5. Establecimiento del monitoreo on – line en las bombas de circulación.	54
3.6. Valoración económica.....	56

3.6.1. Evaluación de los costos de mano de obra en el Mantenimiento Preventivo Planificado (MPP).....	56
3.6.2. Estimación de los costos de mano de obra aplicando el mantenimiento por diagnóstico.	57
3.6.3. Evaluación de los costos del sistema de monitorado on – line.	57
3.7. Impacto ambiental.....	58
3.8. Conclusiones del capítulo.	59
CONCLUSIONES GENERALES	60
RECOMENDACIONES	61
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	63

INTRODUCCIÓN

En el mundo, a través de los años y de forma continua, se han desarrollado varias teorías, filosofías, métodos y técnicas que introducen mejoras en la aplicación de los mantenimientos. En cada uno de estos casos el interés es disminuir cada vez más los costos aumentando la calidad competitiva de los mismos, de forma tal que permita mejorar la disponibilidad, confiabilidad, mantenibilidad y seguridad de las empresas.

En la actualidad, la reducción de los costos de mantenimiento constituye uno de los grandes retos de las empresas a nivel mundial, las cuales están inmersas en la búsqueda de herramientas que contribuyan a la optimización de sus tareas; el monitoreo de la condición se incluye entre las tantas estrategias para lograrlo, mediante la medición y seguimiento de variables de estado, porque con el establecimiento de un sistema de diagnóstico adecuado, es posible determinar la vida útil y el tiempo de operación sin riesgo de falla de los equipos, (Olivero, 2014).

En nuestro país la mantenibilidad de las industrias es todo un reto, las condiciones climatológicas, la forma geográfica de archipiélago de nuestra isla rodeada de mar, condicionan una alta salinidad en el ambiente, provocando un alto grado de corrosión y de desgaste de las maquinarias, esto, ligado a una situación económica difícil con un férreo bloqueo económico que dificulta en gran medida la adquisición de las avanzadas tecnologías, representan una panorámica poco favorable para la ingeniería de mantenimiento en nuestro país. De ahí la necesidad de búsqueda de fórmulas y métodos que permitan la implementación y gestión de un mantenimiento que responda a las características de nuestro país y a la necesidad de lograr una mayor eficiencia en la producción.

Entre las industrias fundamentales de nuestro país se encuentra la destinada a la generación de energía eléctrica, la cual, está basada fundamentalmente en centrales térmicas, la planta de mayor capacidad de generación es la Empresa Termoeléctrica “Lidio Ramón Pérez” que se encuentra localizada geográficamente en la costa norte oriental del archipiélago cubano de la bahía de Nipe, en el consejo popular de Felton del municipio de Mayarí, provincia de Holguín, la misma, es la encargada de suministrar de un 19 a un 23 % de la energía eléctrica a la red nacional. Esta central posee dos bloques de generación de 250 MW de potencia cada uno y un

grupo Fuel – Oil de capacidad generativa de 60 MW, para un total de 560 MW de generación. Para lograr con este fin la Empresa cuenta con dos generadores de vapor de construcción eslovaca que suministran vapor a dos turbinas, marca Skoda, de fabricación Checa, donde se transforma el calor del vapor en trabajo. Una vez realizado trabajo en la turbina, el vapor pasa hacia el condensador donde ocurre un cambio de fase de vapor a agua, la cual es reincorporada al sistema, garantizando de esta manera la eficiencia del ciclo.

Las bombas de circulación se encuentran entre unos de los equipos auxiliares fundamentales de la empresa en cuestión, sin embargo, las del bloque dos, han sido objetos de varias intervenciones por motivos de fallas, existiendo de esta forma ciertas limitantes asociadas a ellas, las cuales son:

- Insuficiente conocimiento de las causas que provocan altas vibraciones.
- Ausencia de un monitoreo on – line que brinde el registro y control constante del comportamiento de las bombas.
- Inexistencia de patrones de vibraciones de referencia de las bombas que permitan diagnosticar con mayor verosimilitud el estado de trabajo de las mismas.
- Incapacidad del mantenimiento preventivo planificado de lograr una alta disponibilidad de las bombas.

Atendiendo a estas deficiencias se declara como **situación problemática** actual:

Para lograr una correcta condensación, es necesario mantener un flujo estable de agua de mar hacia el condensador, lo cual es posible mediante dos bombas de circulación de agua de mar. En el bloque dos, dichas bombas no alcanzan los dos años de explotación, sin embargo, en su corto período de funcionamiento han presentado fallas en reiteradas ocasiones, limitando de esta manera la generación del bloque dos y aumentando considerablemente los costos por mantenimiento de las bombas.

Problema:

El mantenimiento preventivo planificado, al cual están sometidas las bombas de circulación del bloque dos, no garantiza el correcto funcionamiento de las mismas.

Objeto de estudio:

Bombas de circulación de agua de mar 2VC01 y 2VC11.

Campo de acción:

Sistema de mantenimiento de las bombas de circulación del bloque dos.

Objetivo General:

Proponer un sistema de mantenimiento por diagnóstico a las bombas de circulación 2VC01 y 2VC11 del bloque dos, para aumentar la disponibilidad de las mismas, a partir de la data de fallas que representa el comportamiento de estos equipos desde su puesta en marcha hasta la actualidad.

Hipótesis de trabajo:

A partir de la utilización de las herramientas y técnicas del mantenimiento por diagnóstico en las bombas de circulación de agua de mar del bloque dos, es posible aumentar la fiabilidad de estos equipos, así como obtener una mayor disponibilidad de los mismos.

Objetivos específicos:

1. Caracterizar el objeto de estudio mediante patrones vibracionales de referencia que indiquen la ocurrencia de los modos de falla del mismo.
2. Establecer un sistema de monitoreo on – line para las bombas de circulación de agua de mar que permitan el seguimiento y control de los valores globales de vibraciones y los patrones vibracionales.
3. Efectuar un análisis económico del sistema de mantenimiento propuesto teniendo en cuenta los costos por acciones a realizar en las bombas de circulación, y de instrumentación a utilizar en las mismas.

Tareas:

1. Revisión bibliográfica y sistematización de los conocimientos y teorías relacionadas con el mantenimiento por diagnóstico.
2. Procesamiento y análisis de los datos para caracterizar los parámetros de trabajo de las bombas de circulación de agua de mar mediante los patrones de vibraciones.

3. Establecimiento del Análisis de los Modos de Fallas, sus Efectos y las Criticidades, (FMECA), para registrar y jerarquizar las fallas, modos de fallas, y acciones reactivas para su eliminación.
4. Proposición de un sistema de monitorado on – line para las bombas de circulación de agua de mar.
5. Valoración económica – ambiental del sistema de mantenimiento por diagnóstico propuesto a las bombas de circulación de agua de mar del bloque dos.

CAPÍTULO 1

CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO.

1.1. Introducción

La forma de maximizar la eficiencia, la efectividad y la producción de los activos en una empresa generadora de bienes y/o servicios, es mediante el conocimiento y aplicación de las leyes que gobiernan la relación entre producción y mantenimiento. La complejidad empresarial de hoy en día, el gran desarrollo tecnológico involucrado en los equipos de producción y en edificios e instalaciones de prestación de servicio, todo esto ligado a las diferentes definiciones y conceptos sobre mantenimiento que se presentan hoy en día, hacen que el mismo se deba estudiar y aplicar con mayor contenido científico, rigurosidad analítica y profundidad, si se desea que alcance su objetivo principal bajo las condiciones actuales y futuras de sus clientes.

En el presente capítulo se establece como **objetivo** realizar un análisis de la bibliografía existente que permita definir el estado del arte en la temática abordada y sustentar los resultados alcanzados en la investigación.

1.2. Bombas axiales.

Las bombas axiales bombean grandes cantidades de agua con una carga relativamente pequeña, normalmente el rango oscila entre uno y tres metros y esta puede ser agua de río o de mar, agua residual del pretratamiento, aguas de tormenta o lodos activados. Estos tipos de bombas también son conocidas como bombas verticales, las cuales constan de una bomba instalada directamente dentro de un tubo que puede ser de acero o de concreto y que es capaz de impulsar el agua hacia arriba a tres metros como máximo. El líquido entra en dirección axial y la cota se genera por la acción impulsora o de elevación de los álabes, sin que intervenga el efecto centrífugo. El movimiento helicoidal impartido por el rodete al fluido es contrarrestado por los álabes fijos y la descarga se encuentra nuevamente en la dirección axial, (Martínez y Jáuregui, 2007).

El ángulo de inclinación de las aspas tiene gran influencia sobre la cantidad descargada, a menor ángulo, menor cantidad para una velocidad dada. El rendimiento de esta bomba es comparable al de la centrífuga. Para grandes bombas se adopta generalmente el montaje

vertical, pasando el eje por el centro de la tubería de salida. El rodete es de tipo abierto, sin tapas, y su forma es análoga a la de una hélice naval. El agua entra axialmente y los álabes le imprimen una componente rotacional, con lo que el camino por cada partícula es una hélice circular. La misión de los álabes fijos divergentes o álabes directores es volver a dirigir el flujo en dirección axial y transformar la cota cinemática en cota de presión, (Fernández, 2003).

Para evitar la creación de condiciones favorables al destructivo fenómeno de cavitación, las bombas de flujo axial se ubican suspendidas sobre el pozo de succión a baja altura o preferiblemente con la campana de succión y el rodete sumergidos, ya que así la bomba estará siempre cebada y lista para comenzar a funcionar.

Los impulsores están diseñados para que la velocidad del líquido a través de este sea la misma en todo momento es por esto que los ángulos de las aspas se incrementan gradualmente desde los extremos hasta el centro donde se conecta con el eje.

En este sentido Fernández (2003), afirma que en las bombas de flujo axial, la potencia aumenta a medida que se cierra la válvula de descarga, todo lo contrario a lo que ocurre con las bombas centrífugas normales en las que el motor, diseñado para trabajar en condiciones normales, se puede enfrentar con una carga de hasta dos veces la nominal cuando se arranca la bomba a válvula cerrada, por lo que siempre este tipo de bombas se arranca a válvula parcialmente abierta.

1.3. Generalidades sobre el mantenimiento.

Según Picknell (2011), el mantenimiento es un conjunto de acciones necesarias para mantener un equipo o sistema en buen estado técnico, efectuando las actividades para las cuales fue creado. Un importante punto del mantenimiento es conservar todos los recursos involucrados de forma directa o indirecta con el sistema en el mejor estado de funcionamiento, y así garantizar la mejor calidad de operación, las mejores condiciones de seguridad laboral, el mínimo costo y derroche de energía junto a una tasa de confiabilidad elevada de operatividad.

En este sentido Durán (2005), señala que el mantenimiento constituye un sistema dentro de toda organización industrial, cuya función consiste en ajustar, reparar, remplazar o modificar los componentes de una planta industrial para que la misma pueda operar satisfactoriamente

en cantidad y calidad durante un período dado, y constituye uno de los modos idóneos para lograr y mantener mejoras en eficiencia, calidad, reducción de costos y de pérdidas, optimizando así la competitividad de las empresas que lo implementan dentro del contexto de la Excelencia Gerencial y Empresarial. De igual manera define los objetivos del mantenimiento en tres puntos claves:

- Dirigir la división de mantenimiento de manera que se obtengan costos totales mínimos de operación.
- Mantener las instalaciones y equipos en buenas condiciones operacionales.
- Mantener las instalaciones y equipos operando en un porcentaje óptimo del tiempo.

Estos objetivos sirven de apoyo logístico para que otras áreas empresariales puedan cumplir su función de producción de bienes o servicios.

En las empresas vencedoras el empleo de mantenimiento ha reaccionado rápido a estos cambios. Esta nueva actitud incluye una creciente concientización de en que medida una falla del equipamiento afecta la seguridad y el medioambiente; una mayor conciencia de la relación entre mantenimiento y calidad del producto, y mayores exigencias en cuanto a conseguir una alta disponibilidad y confiabilidad de la instalación, al mismo tiempo que se trabaja por la reducción de los costos. Estos cambios están exigiendo nuevas actitudes y habilidades del personal de mantenimiento, desde los gerentes, pasando por los ingenieros y supervisores, hasta llegar a los ejecutores.

1.3.1. Evolución del mantenimiento.

El progreso del mantenimiento permite distinguir varias etapas evolutivas, en relación a los diferentes objetivos que se observan en las áreas productivas o de manufactura a través del tiempo; el análisis se lleva a cabo en cada estas etapas, que muestran las empresas en función de sus metas de producción para ese momento, la clasificación general relaciona las áreas de mantenimiento y producción en términos de evolución, (Mora, 2005).

Moubray (1997), señala que el mantenimiento ha ido evolucionando a través del tiempo; desde el punto de vista práctico, 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, en la figura 1.1 se recogen las tres generaciones en la que se divide el mantenimiento.



Figura 1.1. Evolución del mantenimiento. Fuente: Moubray (1997).

1.3.1.1. Primera generación de la evolución del mantenimiento.

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.

Unido a esto, y debido a la coyuntura económica de la época, la cuestión de la productividad no era prioritaria. Consecuentemente no era necesario un mantenimiento sistematizado; apenas servicios de limpieza, lubricación y reparación después de la rotura, o sea, el mantenimiento era fundamentalmente, correctivo, (Mora, 2005).

1.3.1.2. Segunda generación de la evolución del mantenimiento.

Según Lahera (2015), 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 las fallas de la maquinaria se podían y debían prevenir, idea que tomaría el nombre de mantenimiento preventivo. Se comenzaron a

implementar sistemas de control y planificación del mantenimiento, o sea las revisiones a intervalos fijos.

En este sentido González y Echevarría (2002), señalan que en esta etapa comienza a despuntar la especialización en materia de mantenimiento, intensificándose gradualmente la aplicación de varias materias – fundamentalmente la estadística – en el campo del mantenimiento, requiriendo de este modo la necesidad de una mayor capacitación del personal técnico.

1.3.1.3. Tercera generación de la evolución del mantenimiento.

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 la dependencia del ser humano hacia ellas, se exigen productos y servicios de calidad, considerando aspectos de seguridad y medio ambiente.

Según Kardec y Nascif (2002), el crecimiento de la industrialización automatizada comenzó a señalar la confiabilidad y la disponibilidad como aspectos claves en sectores tan distintos como la salud, el procesamiento de datos, las telecomunicaciones y la administración de edificaciones. En algunas partes del mundo se está llegando a un punto en que, o las empresas satisfacen estos aspectos o podrán ser impedidas de funcionar. En la tercera generación la interacción entre las fases de implantación de un sistema con la Disponibilidad y la Confiabilidad se hace más evidente, es decir se refuerza el concepto de un Mantenimiento por Diagnóstico.

1.3.2. Herramientas del Mantenimiento

Uno de los programas actuales y de gran importancia en muchas de nuestras industrias, es el aumento de paradas por roturas imprevistas debido principalmente al envejecimiento de nuestra tecnología y equipos. Para su solución se hace necesaria la elaboración de un método de análisis de las causas que provocan los fallos en los equipos, el cual, permite obtener los resultados deseados, (Tavares, 2006).

Es de especial significación para la disminución de las paradas en la producción, un análisis integral que considere los diferentes aspectos que intervienen en la ocurrencia de los fallos, su evaluación, las medidas para la corrección y prevención de estos, incluida una evaluación económica de estas medidas. Para mayor facilidad a la hora de realizar estos análisis se utilizan distintas herramientas que han sido productos de la búsqueda de nuevos métodos y esquemas que optimicen la toma de decisiones a la hora de implantar la estrategia correcta en la prevención de fallos; las herramientas de mayor difusión a escala mundial son:

- Análisis de Pareto
- Análisis Causa – Efecto
- Modos de fallos y análisis de causas y efectos (FMECA)
- Análisis de Criticidad

1.3.2.1. Diagrama de Pareto.

Según Picknell (2011), el diagrama de Pareto, también llamado curva cerrada o Distribución A-B-C, es una gráfica para organizar datos de forma que estos queden en orden descendente, de izquierda a derecha y separados por barras. Permite, pues, asignar un orden de prioridades. El diagrama permite mostrar gráficamente el principio de Pareto (pocos vitales, muchos triviales), es decir, que hay muchos problemas sin importancia frente a unos pocos muy importantes. Mediante la gráfica colocamos los pocos que son vitales a la izquierda y los muchos triviales a la derecha.

El diagrama facilita el estudio de las fallas en las industrias o empresas comerciales, así como fenómenos sociales o naturales psicosomáticos. Hay que tener en cuenta que tanto la distribución de los efectos como sus posibles causas no es un proceso lineal, sino que el 20% de las causas totales hace que sean originados el 80% de los efectos. El principal uso que tiene la elaboración de este tipo de diagrama es para poder establecer un orden de prioridades en la toma de decisiones dentro de una organización. Evaluar todas las fallas, saber si se pueden resolver o mejor evitarlas, (Castillo, 2006).

1.3.2.2. Análisis Causa – Efecto.

El Diagrama de Causa y Efecto es utilizado para identificar las posibles causas de un problema específico. La naturaleza gráfica del Diagrama permite que los grupos de profesionales organicen grandes cantidades de información sobre el problema y determinen exactamente las posibles causas, (Tavares, 2006).

El Diagrama de Causa y Efecto se debe utilizar cuando se pueda contestar “sí” a una o a las dos preguntas siguientes:

¿Es necesario identificar las causas principales de un problema?

¿Existen ideas y/u opiniones sobre las causas de un problema?

En este sentido Díaz (1992), establece que los diagramas de causa y efecto, ilustran la relación entre las características y aquellas causas que, por razones técnicas, se consideren que ejercen un efecto sobre el proceso. Cuando se utilizan con otras herramientas estadísticas, tales como los diagramas de Pareto, los diagramas de causa y efecto son útiles para promover la mejora del proceso según prioridades, acumular y organizar los conocimientos y la tecnología, consolidar las ideas de todos los empleados sobre las actividades relacionadas con el control, y facilitar las discusiones, la educación y otros diversos aspectos de las relaciones humanas. Puesto que todo el mundo los comprende fácilmente, son una de las herramientas importantes para la promoción y puesta en práctica del control de calidad.

1.3.2.3. Análisis de los Modos de Fallas, sus Efectos y las Criticidades, (FMECA).

Según Gonzáles y Hechevarría (2002), el FMECA (Failure Modes and Effects Criticality Analysis) es una metodología que permite realizar un análisis de las funciones, modos de fallos, causas y consecuencias de los fallos, en diferentes niveles de profundidad de un subsistema. Además, consiste en definir en los sistemas y subsistemas los siguientes parámetros:

- Fronteras
- Funcionabilidad
- Modos de fallo y sus frecuencias
- Causas que provocan la forma de fallar

➤ Consecuencias y severidad

Según Picknell (2011), cada componente en un sistema o equipo tiene su combinación única de modo de falla, con sus propios grados de fallas. Cada combinación de componentes es única y la ocurrencia de falla en un componente lo más probable es que esté relacionada con la ocurrencia de falla de otro. Cada sistema opera en un único ambiente que consiste en la localización, altitud, profundidad, atmósfera, presión, temperatura, humedad, salinidad, exposición a fluidos de distintos productos, velocidad, aceleración, entre otros. Cada uno de estos factores pueden influir en el modo de falla de estos equipos, incluso a hacerlos menos o más predominantes que otros. Es por ello que a la hora de realizar un análisis de los modos de las fallas, sus causas y sus efectos es necesario realizar las siguientes acciones:

- Determinar y especificar las funciones que realizan los ítems
- Describir las fallas resultantes de las funciones que realizan
- Describir como ocurren las fallas (modo de falla)
- Describir los efectos de las fallas

1.3.2.4. Análisis de Criticidad

Mendoza (2010), se refiere al análisis de criticidad como una metodología que permite establecer la jerarquía o prioridades de procesos, sistemas y equipos, creando una estructura que facilita la toma de decisiones acertadas y efectivas, direccionando el esfuerzo y los recursos en áreas donde sea más importante y/o necesario mejorar la confiabilidad operacional, basado en la realidad actual.

Este análisis permite trazar estrategias que permiten balancear las atenciones en un sistema determinado, estableciendo de esta forma las diferencias de prioridades que deben de poseer los equipos o instalaciones. Por otra parte, el análisis es posible establecerlo en un sistema en general o en subsistemas, siendo capaz de realizar comparaciones que permitan llegar a conclusiones más profundas y certeras, es decir, se puede realizar una ponderación entre equipos, instalaciones, e incluso entre empresas que pertenezcan a una red nacional o regional.

Según Lahera (2014), el análisis de criticidad genera una lista ponderada desde el elemento más crítico hasta el menos crítico del total de criterios analizado, diferenciando tres zonas de clasificación:

- 1- Alta criticidad
- 2- Mediana Criticidad
- 3- Baja criticidad

Una vez identificadas estas zonas, es mucho más fácil diseñar una estrategia, para realizar estudios o proyectos que mejoren la confiabilidad operacional, iniciando las aplicaciones en el conjunto de procesos o elementos que formen parte de la zona de alta criticidad.

En este sentido Mendoza (2010), destaca que el mejoramiento de la confiabilidad operacional de cualquier instalación o de sus sistemas y componentes está asociado con cuatro aspectos fundamentales: confiabilidad humana, confiabilidad del proceso, confiabilidad del diseño y la confiabilidad del mantenimiento.

1.3.3. Programa de Mantenimiento por Diagnóstico.

El Mantenimiento por diagnóstico, consiste en estudiar la evolución temporal de ciertos parámetros y asociarlos a la evolución de fallos, para así determinar en que período de tiempo, ese fallo va a tomar una relevancia importante y poder planificar todas las intervenciones con tiempo suficiente, para que ese fallo nunca tenga consecuencias graves. En síntesis, consiste en el análisis de parámetros de funcionamiento cuya evolución permite detectar un fallo antes de que este tenga consecuencias más graves, (Kardec y Nascif, 2002).

Tavares (2002), señala que una de las características más importantes de este tipo de mantenimiento es que no debe alterar el funcionamiento normal de la planta mientras se está aplicando, además de que empieza en las fases de especificación, proyecto, fabricación e instalación logrando la minimización de los costos de mantenimiento preventivo y correctivo, así como la maximización de la eficiencia del mantenimiento. Lográndose de esta manera preservar en gran medida la disponibilidad del equipo o sistema.

Por otra parte Palomino (2001), estipula que en el sistema de Mantenimiento por Diagnóstico, la entrada a este serán los parámetros de diagnósticos obtenidos como resultado de la medición

correcta de diferentes magnitudes físicas, que contribuyan a conformar un criterio preciso sobre la condición de operación de la máquina. Por supuesto, las características técnicas de la maquinaria, el Tiempo Medio entre Fallas (MTBF), los parámetros tecnológicos, entre otros, también forman parte de la entrada al sistema. La salida del sistema del mantenimiento por diagnóstico será un conjunto de datos. Datos que serán tomados en cuenta para planificar y programar las acciones correctivas.

Según Kardec y Nascif (2002), las condiciones básicas para implantar el Mantenimiento por Diagnóstico son las siguientes:

- El equipamiento, sistema o instalación debe permitir algún tipo de monitoreo o medición.
- El equipamiento, sistema o instalación debe justificar ese tipo de acción en función de los costos involucrados.
- Las fallas deben tener causas que puedan ser monitoreadas y tener su progresión controlada.
- Que sea establecido un programa sistematizado de seguimiento, análisis y diagnóstico de la condición del equipamiento.

Es necesario verificar que las condiciones antes expuestas se cumplan en los ítems que se desee implantar el mantenimiento por diagnóstico, ya que la implementación requiere de un alto costo en instrumentación y una alta demanda de personal capacitado, de ahí que el mayor inconveniente de este sistema de mantenimiento sea del orden económico. No obstante según Mora (2005) y Amendola (2005), se pueden obtener cuantiosas ventajas de este programa, tales como:

- Reduce el tiempo de parada, al conocerse exactamente que órgano fue el que falló.
- Permite seguir la evolución de un defecto en el tiempo.
- Optimiza la gestión del personal de mantenimiento.
- Requiere de una plantilla de mantenimiento más reducida.
- La verificación del estado de la maquinaria, tanto realizada de forma periódica como de forma accidental, permite confeccionar un archivo histórico del comportamiento mecánico y operacional muy útil en estos casos.

- Conocer con exactitud el tiempo límite de actuación que no implique el desarrollo de un fallo imprevisto.
- Toma de decisiones sobre la parada de una línea de máquinas en momentos críticos.
- Confección de formas internas de funcionamiento o compra de nuevos equipos.
- Permitir el conocimiento del historial de actuaciones, para ser utilizada por el mantenimiento correctivo.
- Facilita el análisis de las averías.
- Permite el análisis estadístico del sistema.
- Posibilita la toma de decisiones sobre la parada de una línea de máquinas en momentos críticos.
- Define los límites de tendencia relativos a los tiempos de fallas o de aparición de condiciones no estándares.

Las acciones de mantenimiento trátense de planeadas (como también las modificativas y las correctivas), no son ni buenas ni malas en sí mismas; solo llegan a ser más adecuadas unas que otras en la medida que se realicen a partir de una táctica dada y de unos criterios técnicos que permitan establecer si la estrategia utilizada es la más económica y conveniente. Las acciones se deben seleccionar a la luz principalmente del grado de desarrollo que posea la empresa en cuestión en el nivel instrumental, pues es este último quien condiciona la viabilidad de la aplicación de reparaciones o mantenimientos, (Mora, 2005).

Según Palomino (2001), el Programa de Mantenimiento Predictivo contempla de modo eficaz seis etapas imprescindibles:

- Mediciones periódicas
- Detección del problema
- Identificación del defecto y su causa
- Pronóstico de fallo
- Planificación de la intervención
- Corrección del problema y eliminación de la causa
- Prueba de aceptación

En este sentido Campbell (2010), señala que en general, el Programa de Mantenimiento Predictivo contribuye en principio, a detectar el comienzo de un fallo potencial a la vez que permite disponer de las herramientas necesarias para analizar la causa del problema que se está desarrollando, lográndose determinar finalmente, el momento oportuno para – de forma dirigida – corregir eficaz y eficientemente el problema detectado.

1.3.4. Técnicas de Diagnóstico.

Las Técnicas de Diagnóstico constituyen la columna vertebral del Programa de Mantenimiento por Diagnóstico, y piedra angular en otras políticas de mantenimiento establecidas en el orden internacional. Por su veracidad en los resultados y constante evolución debido al avance tecnológico en el cual estamos inmersos, cada vez es más amplia la esfera que rodea estas técnicas, de ahí su enorme diversidad y constante crecimiento. Según Mora (2005), las Técnicas de Diagnóstico más renombradas a nivel mundial son las siguientes:

- Inspección visual, acústica y al tacto de componentes
- Vigilancia de temperaturas
- Control de la corrosión
- Resistencia eléctrica
- Lubricación, engrase y aceites
- Monitoreo de causas y efectos eléctricos
- Termografía infrarroja
- Líquidos penetrantes
- Ensayo de pulverizado de partículas magnéticas
- Ultrasonido
- Control de ruido
- Filtros magnéticos
- Corrientes inducidas
- Análisis de vibraciones

Estas Técnicas de Diagnóstico no están restringidas solamente a la evaluación de las condiciones de operación de las máquinas críticas, sino que pueden evaluar con precisión la

mayoría, por no decir todos, los factores que limitan la efectividad y la eficiencia de la planta o la industria en general.

De todas las técnicas predictivas no hay dudas de que el análisis de las vibraciones constituye el mejor indicador de estado de la maquinaria industrial, sin dejar a un lado las otras técnicas. El modo más sencillo de aplicar las Técnicas de Diagnóstico empleando las vibraciones como parámetro, consiste en la medición de niveles totales de vibraciones a intervalos periódicos, en aquellos puntos que constituyen los que mejor revelan el comportamiento dinámico de la máquina, (Mora y Pérez, 2010), (Palomino, 2003), (Mondelo, 2014).

1.3.5. Análisis de Vibraciones.

Según Royo y Torres (2008), la vibración es el movimiento de vaivén de una máquina o elemento de ella en cualquier dirección del espacio desde su posición de equilibrio. Generalmente, la causa de la vibración reside en problemas mecánicos como son: desequilibrio de elementos rotativos, desalineación en acoplamientos, engranajes desgastados o dañados, rodamientos deteriorados, fuerzas aerodinámicas o hidráulicas, y problemas eléctricos.

Según Campbell (2010), la puesta en marcha de un sistema de vigilancia en vibraciones se puede realizar en tres fases:

- Medición de los niveles de vibración con sistema de medición portátil o sonora, cuyo propósito es determinar varios valores iniciales.
- Análisis del comportamiento de frecuencia mediante filtración de banda para erradicar incidentes no deseados o parásitos.
- Vigilancia permanente con la aplicación de sistema de análisis integral y monitoreo en tiempo real.

Palomino (2003), destaca que la experiencia ha demostrado ampliamente que en la máquina se pueden estar desarrollando problemas potenciales y no existir ningún indicio de estos en los niveles totales de vibraciones. Sin embargo, los espectros de vibraciones si resultan sensibles a estos problemas. Esto quiere decir, que si no se dispone de una técnica que sea sensible a los cambios en el espectro, entonces el analista no podrá enterarse de la presencia de algún

problema potencial, si solo atiende a la evolución de los niveles totales de vibraciones, aun cuando disponga de alarmas muy rigurosas. Para el análisis y comprensión de los patrones vibracionales es necesario tener en cuenta la frecuencia fundamental del equipo la cual está definida por la siguiente expresión:

1.3.5.1. Monitorado de las Vibraciones.

Según la Norma ISO 13733 – 1, el monitorado de las vibraciones está dirigido a asistir la evaluación de la salud de la máquina durante su funcionamiento. La selección de los parámetros a controlar y del sistema de monitorado conveniente, depende del tipo de máquina y de los componentes críticos a los que se les efectuarán las mediciones. El objetivo de este programa es detectar, con tiempo suficiente, cualquier indicio de ocurrencia de una falla, para llevar a cabo las acciones pertinentes en pos de erradicar los defectos que propicien una disminución de la producción o la ocurrencia de un fallo total en la máquina. Los sistemas de monitorado pueden ser instalados permanentemente (on – line), semipermanentes o utilizar equipos portables de medición (off – line); la decisión de seleccionar el sistema apropiado de medición depende de los siguientes factores:

- Criticidad de la máquina
- Impacto del tiempo no operativo de la máquina
- Costo de falla catastrófica
- Costo de la máquina
- Accesibilidad para la reparación
- Accesibilidad a las posiciones de mediciones apropiadas
- Calidad del sistema de diagnóstico
- Modos operacionales de la máquina
- Costo del sistema de monitorado
- Seguridad
- Impacto medioambiental

1.4. Disponibilidad.

González y Hechevarría (2002), señalan que la Disponibilidad constituye el principal indicador de evaluación de una máquina, sistema o proceso; su estudio, análisis y aplicación

van más allá que un simple cálculo estadístico. Hoy por hoy, en varias empresas a nivel mundial la Disponibilidad posee gran peso en el salario de los trabajadores, en algunas incluso es determinante, de ahí la vitalidad del manejo y conocimiento de tal indicador.

Knesevic (1996), resalta que la Disponibilidad es una característica que resume cuantitativamente el perfil de funcionalidad de un elemento. Es una medida extremadamente importante y útil en casos en los que el usuario tiene que tomar decisiones con respecto a la adquisición de un elemento entre varias posibilidades alternativas.

Para comprender mejor el lugar de la Disponibilidad en un Sistema Integral de Mantenimiento, es necesario visualizar en la figura 1.2 que los tres elementos o actores principales en un sistema de ingeniería de fábricas son: los mantenedores, los productores y las máquinas; donde, la relación entre Producción y Máquinas está gobernada por la confiabilidad, la correspondencia entre Mantenimiento está estipulada por la mantenibilidad; y la relación Mantenimiento – Máquina – Producción está definida por la disponibilidad que es el efecto integrado de la ingeniería de fábricas, donde se marca como el efecto o parámetro más relevante del sistema, (Mora, 2005).

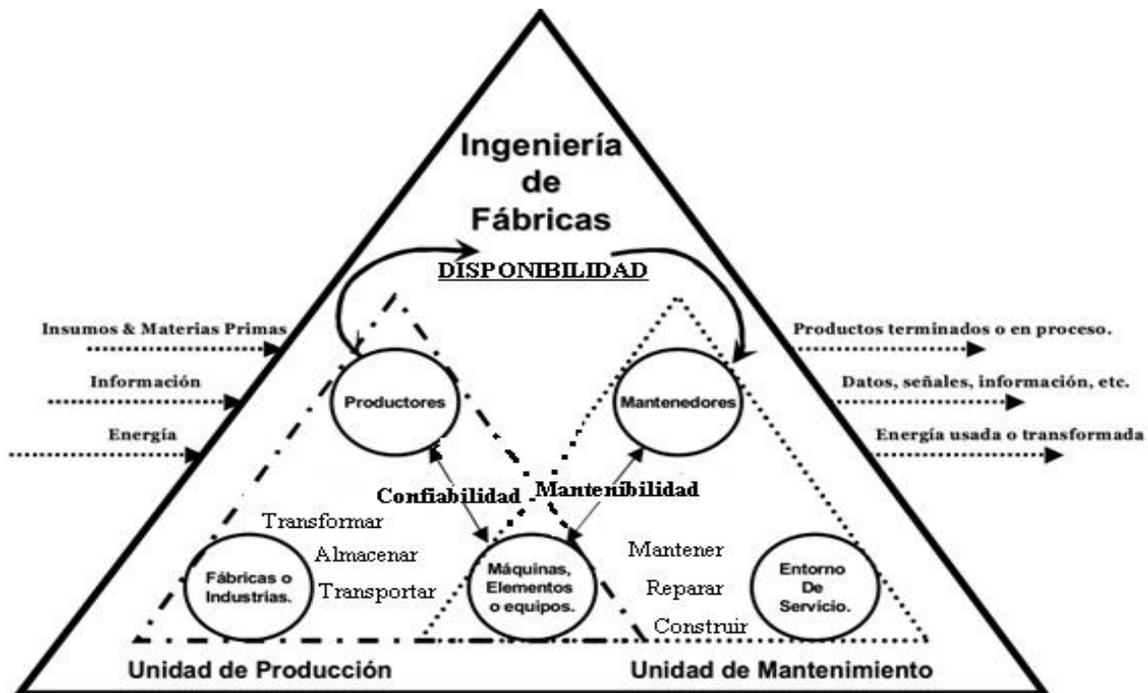


Figura 1.2 Sistema Integral de Mantenimiento. Fuente: (Mora, 2005).

Según Mora (2005), la confiabilidad se mide a partir del número y duración de las fallas, la mantenibilidad se cuantifica a partir de la cantidad y de la duración de las reparaciones; mientras que la disponibilidad se mide a partir de la confiabilidad y de la mantenibilidad, como se aprecia en la expresión 1.1.

$$Disponibilidad = \frac{Confiabilidad}{Confiabilidad + Mantenibilidad} \quad 1.1$$

La disponibilidad es una característica que resume cuantitativamente el perfil de funcionalidad de un equipo. La mayoría de los usuarios aseguran que necesitan la disponibilidad de un equipo tanto como la seguridad. Hay varios métodos para lograrlo, uno es construir un equipo que cuando falle sea fácil de recuperar, y el otro es que sea confiable, y por lo tanto demasiado costoso.

1.4.1. Opciones de Disponibilidad.

El estudio de la Disponibilidad ha generado cuantiosas técnicas para su modelación y determinación, las mismas van desde las más simples que se basan en indicadores puntuales e instantáneos que se calculan independientemente de la estimación de probabilidades, hasta otras más complejas donde sí se tienen en cuenta lo antes dicho. Según Amendola (2005) las opciones de Disponibilidad más frecuentes son las siguientes:

- Disponibilidad Genérica
- Disponibilidad Alcanzada
- Disponibilidad Inherente
- Disponibilidad Operacional

Cada una está estrechamente relacionada, sus diferencias radican principalmente en la apreciación de los diferentes tiempos de reparación y trabajo útil y la consideración o no de determinados factores.

1.4.1.1. Disponibilidad Genérica

Es útil cuando no se tienen desglosados los tiempos de reparaciones o de mantenimientos planeados; o cuando no se mide con exactitud ni los tiempos logísticos, ni administrativos ni

los tiempos de demoras por repuestos o recursos humanos que afecten el tiempo no operativo, (Nachlas, 1995).

En esta Disponibilidad el tiempo medio de funcionamiento entre falla solo considera los tiempos en los que el que el equipo funciona correctamente. No asume que el tiempo en el que el equipo funciona correctamente sea alto y el tiempo de no operación sea bajo. Debe usarse entre dos y n eventos.

1.4.1.2. Disponibilidad Inherente

Esta Disponibilidad es la probabilidad de que el sistema opere satisfactoriamente cuando sea requerido en cualquier tiempo bajo las condiciones de operación especificadas y un entorno ideal de soporte logístico, es decir con la disponibilidad adecuada de personal, repuestos, herramientas, equipos de prueba y demás, sin considerar ninguna demora logística o administrativa. Considera que la no funcionalidad del equipo es inherente al tiempo activo de reparación, (Mora y Pérez, 2010).

1.4.1.3. Disponibilidad Alcanzada

Según Díaz (1992), la Disponibilidad Alcanzada difiere de la Inherente en que se involucra en sus cálculos los tiempos imputables a las actividades planeadas de mantenimiento. Cuando se presente el caso de que durante la realización de tareas proactivas o planeadas (predictivas o preventivas) aparezca un daño que implique una reparación, se debe tomar la corrección como un evento independiente y considerarse los dos tiempos en forma aislada, debido a que la reparación requiere de hora – hombres adicional al mantenimiento preventivo, se puede manejar como un tiempo correctivo entre dos preventivos o simplemente tomar un preventivo por el tiempo invertido y otro correctivo por la acción no planeada, pero en todo caso los dos tiempos en forma separada contabilizándolos a ambos.

1.4.1.4. Disponibilidad Operacional

La Disponibilidad Operacional es la probabilidad de que el sistema opere satisfactoriamente, cuando se requiere que funcione bien en cualquier tiempo bajo las condiciones de operación especificadas en un entorno real de soportes logísticos, abarcando, por lo tanto dentro de los tiempos de mantenimiento, los tiempos causados por los retrasos logísticos y administrativos,

es decir, todos los tiempos concernientes al estado de reparación, incluyendo el mantenimiento programado y no programado, (Mora, 2005).

1.5. Conclusiones del Capítulo.

1. La revisión bibliográfica demostró la existencia de una amplia bibliografía referente al Mantenimiento Predictivo y a su uso como una herramienta eficaz para lograr una alta Disponibilidad en los equipos y sistemas en el ámbito industrial actual.
2. Se constató que las vibraciones constituyen el principal parámetro de estado a la hora de reflejar el estado técnico de un equipo, lo que implica que el control de las mismas, figura como la acción más importante a la hora de llevar a cabo un Mantenimiento Predictivo.

CAPÍTULO 2

CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Introducción

Para seleccionar la estrategia de mantenimiento correcta no existe una metodología rígida que permita el establecimiento de la misma. Debido a su complejidad y a la dependencia de diversos factores de carácter objetivo y subjetivo, la política de mantenimiento a implementar, requiere de un estrecho vínculo entre conocimiento y experiencia, donde el eje central alrededor del cual se debe mover esta maquinaria es la Disponibilidad del equipo o sistema a mantener.

A través de los años, no pocos estudiosos han formulado diversas herramientas que permitan encausar experiencia y conocimiento en pos de lograr la correcta política de mantenimiento, todo depende de saber combinar y utilizar dichas herramientas correctamente, así como interpretar de manera eficaz sus resultados para lograr tener poderosos recursos a la hora de tomar determinadas decisiones.

El **objetivo** del siguiente capítulo es exponer las metodologías de las herramientas del mantenimiento que se utilizarán, así como el equipo a utilizar para realizar la caracterización de las bombas de circulación de agua de mar 2VC01 y 2VC11.

2.2. Características de las bombas 2VC01 y 2VC11

Las bombas de circulación de fabricación china modelo SEZ1300-1080/950 (Figura 2.1), son bombas de flujo axial que succionan el agua de mar del canal y la trasiega hacia el condensador como agua de enfriamiento para lograr la condensación del vapor procedente de turbina.

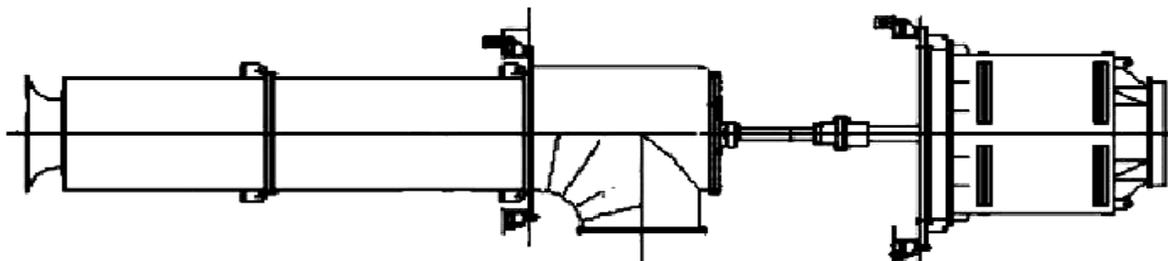


Figura 2.1. Bomba de circulación de agua de mar.

Estas bombas están diseñadas para el 100 % de la potencia del bloque de generación, en caso de tener una sola por las dos secciones se limitará al 60 % de su potencia según se plantea en el manual descriptivo de operaciones.

El funcionamiento sumergido de las bombas elimina el inconveniente del cebado, por lo que el impulsor se halla continuamente, aún parado, rodeado por el líquido a impulsar y, por lo tanto, la bomba está en disposición de funcionar en cualquier momento. El control de la unidad requiere únicamente la puesta en marcha del motor de accionamiento, sin necesidad de dispositivos adicionales de cebado previo. La succión, que es siempre por abajo, se hace a una cierta profundidad con respecto al nivel libre del líquido.

Los datos técnicos de las bombas se muestran en la tabla 2.1.

Tabla 2.1. Parámetros de trabajo de las bombas de circulación. Fuente: Manual del fabricante.

Parámetros	Unidad	Valor
Flujo	m ³ /s	5,0
Frecuencia de rotación	min ⁻¹	445
NPSHr	m	8,8
Densidad	kg/m ³	1020
Potencia	kW	602
Frecuencia	Hz	60

Funciones de las bombas de circulación de agua de mar:

1. Hacer circular a través del condensador el agua de mar procedente del canal y que es previamente filtrada por los filtros del sistema Taprogge y así garantizar el flujo necesario para condensar el vapor de escape del cilindro de baja presión de la turbina.
2. Pasar parte de esta agua de mar a los enfriadores del circuito de agua de enfriamiento para la disminución de la temperatura.

En cuanto al control automático o monitorización que llevan los operadores en la sala de control de unidad siguen en el tiempo los siguientes parámetros:

- Dispara por sobre corriente mayor que 91 A.
- Alta temperatura en el devanado del motor: dispara a 140 °C.
- Alta temperatura de los rodamientos del motor: dispara a 80 °C.
- Alta temperatura de los rodamientos de la bomba: dispara a 70 °C.
- Mínimo nivel en el canal: dispara a - 4,7 m.
- Máxima presión en la descarga: dispara a 150041,745 Pa
- Se bloquea por ausencia de presión de aire para señalar el nivel en canal.
- Se bloquea por tener la compuerta de descarga abierta al entrar en servicio.

2.3. Metodologías de las herramientas del mantenimiento

Los resultados que arrojen las herramientas del mantenimiento a utilizar, permitirán vislumbrar las principales causas que incitan la ocurrencia de alguna falla y de este mismo modo establecer las acciones necesarias para contrarrestar dichas causas. La obtención de dichos resultados constituye un surtido de recursos valiosos a la hora de trazar la estrategia idónea de mantenimiento, figurando como piedra angular en las discusiones que imperan en la toma de decisiones.

Es necesario destacar que en el momento de interpretar los resultados, es de vital importancia la participación de personal especializado y de expertos, lo que permitirá de forma sólida y concisa la conjugación de experiencia y conocimiento.

2.3.1. Análisis de Criticidad

El análisis de criticidad se efectuará al subsistema de enfriamiento del turbo grupo dos, el cual es el encargado de garantizar un alto rendimiento durante el funcionamiento de la turbina y está conformado por los siguientes equipos dinámicos:

- Las bombas de circulación o agua de mar.
- Las bombas de vacío del condensador

- Las bombas de enfriamiento o agua dulce.
- Las bombas de enfriamiento estatórico.

Para la selección del personal del grupo de trabajo se tuvo en cuenta la experiencia de cada uno de los integrantes, así como el conocimiento acerca del funcionamiento de cada uno de los equipos a analizar. Teniendo en cuenta lo antes dicho el grupo técnico de trabajo está integrado por:

1. Especialista Principal de Diagnóstico
2. Especialista en análisis dinámico.
3. Especialista principal en Pieza de Repuesto.
4. Especialista Principal de Planificación.
5. Técnico en Explotación de Centrales Eléctricas.

A cada uno de los miembros del grupo de trabajo se le realizará una encuesta, la cual se muestra en el anexo A – 1.

En cada casilla en blanco se dará una puntuación, para lo cual se utilizará como guía la tabla 2.2, En la cual se recogen los criterios que están asociados con: seguridad, ambiente, producción, costo de operación y mantenimiento, data de fallas y tiempo promedio de reparación (TPPR) principalmente.

Tabla 2.2. Guía de puntuación para el Análisis de Criticidad.

		CRITERIOS DE EVALUACIÓN PARA CRITICIDAD
1.- FRECUENCIA DE FALLA (todo tipo de falla)		Puntaje
No más de una por año		1
Entre dos y cinco por año		3
Entre seis y 10 por año		4
Más de 10 por año (una interrupción mensual)		6
2.- IMPACTO OPERACIONAL		
2.1.- NIVEL DE PRODUCCIÓN (de la Instalación)		Puntaje

Tiene que ver hasta un 10 %	1
Tiene que ver entre un 10 y 20 %	2
Tiene que ver entre un 20 y 40 %	4
Tiene que ver entre un 40 y 60 %	6
Tiene que ver entre un 60 y 80 %	9
Tiene que ver entre un 80 y 100 %	12
2.2.- TIEMPO PROMEDIO PARA REPARAR (TPPR)	Puntaje
Menos de cuatro horas	1
Entre cuatro y ocho horas	2
Entre nueve y 24 horas	4
Más de 24 horas	6
2.3.- IMPACTO EN PRODUCCION (por falla)	Puntaje
No afecta	0,05
25 % de la generación	0,3
50 % de la generación	0,5
75 % de la generación	0,8
La Impacta Totalmente	1
2.4.- COSTO DE REPARACION	Puntaje
Menos de 1000 CUP	3
Entre 3000 y 2000 CUP	5
Entre 4000 y 3000 CUP	10
Más de 5000 CUP	25
2.5.- IMPACTO EN LA SEGURIDAD PERSONAL	Puntaje
SI	35
NO	0
2.6.- IMPACTO AMBIENTAL	Puntaje
SI	30
NO	0

Una vez obtenidas todas las encuestas, se promedian los puntajes para obtener una única tabla que me permita determinar la criticidad de cada equipo utilizando la ecuación 2.1.

importancia absoluta o relativa. Adicionalmente permite observar en forma acumulada la incidencia total del factor en estudio, (Mondelo 2014).

Según Castillo (2006), el diagrama de Pareto es muy útil para obtener la cooperación de todos los involucrados porque un simple vistazo permite percibir en que consiste el problema principal: las dos o tres barras más altas son las que corresponden a la mayor parte de los problemas; las más pequeñas señalan causas menores. La experiencia enseña que es más fácil reducir a la mitad una barra alta que reducir a cero una corta. Si reducir a la mitad una barra alta requiere el mismo esfuerzo que hacer lo propio con una barra corta, no hay duda de cual deberá seleccionarse como objetivo. Así, se puede afirmar que la gran ventaja del diagrama de Pareto es que permite precisar los factores más importantes en los cuales corresponde, por tanto, concentrar la atención.

Los diagramas de Pareto pueden entonces ser aplicados para lograr mejoras, por ejemplo, para mejorar la prevención de averías y ser utilizados para analizar la efectividad de los planes de medidas, es decir, si los esfuerzos de mejora arrojan resultados esperados.

2.3.3. Diagrama causa – efecto de Ishikawa.

Según Mora (2005), el diagrama de Ishikawa (figura 2.2), recibe el nombre de espina de pescado o diagrama de árbol o de río. En primera instancia ubica y esquematiza todas las causas potenciales que generan la falla o el defecto en el servicio de mantenimiento o de producción, posteriormente establece planes para su eliminación o control. Su utilización es práctica, sencilla, grupal y muy aplicada a nivel mundial.

El Diagrama de Causa y Efecto es utilizado para identificar las posibles causas de un problema específico. La naturaleza gráfica del Diagrama permite que los grupos organicen grandes cantidades de información sobre el problema y determinen exactamente las posibles causas. Finalmente, aumenta la probabilidad de identificar las causas principales.

Es necesario señalar que los Diagramas de Causa y Efecto únicamente identifican causas posibles. Aun cuando todos estén de acuerdo en estas causas posibles, solamente los datos apuntarán a las causas.

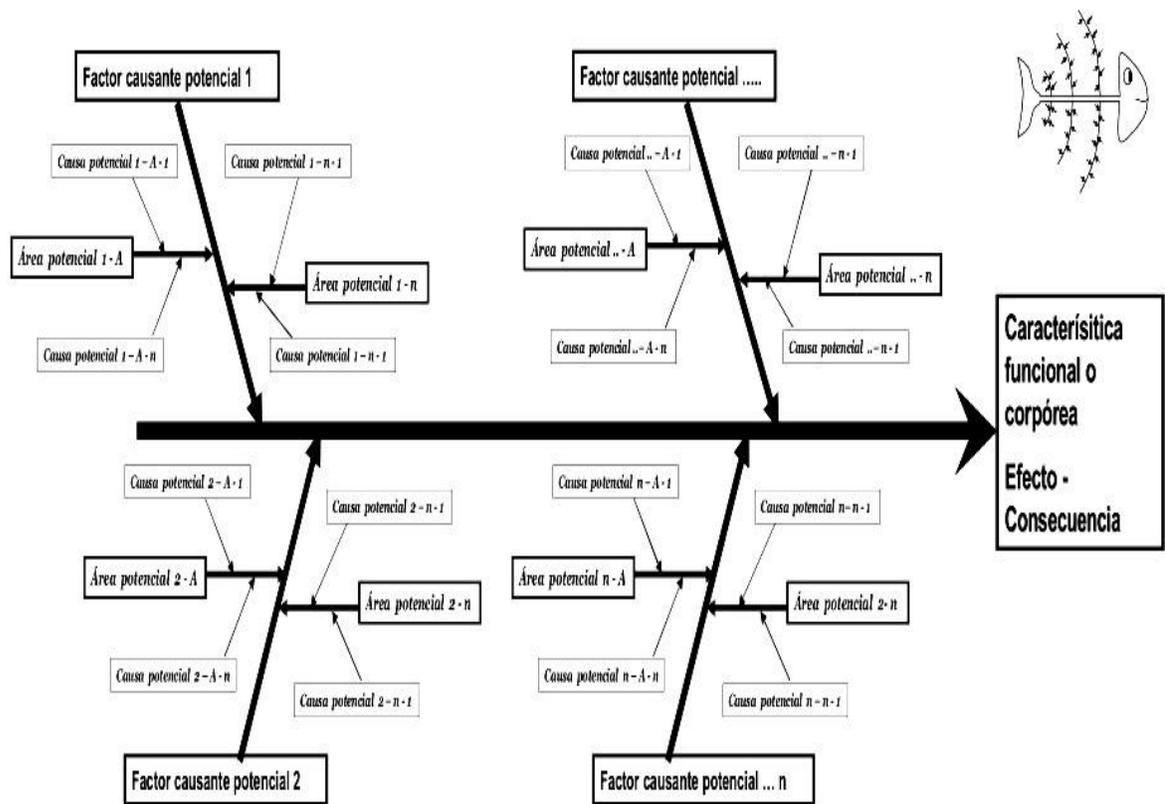


Figura 2.2. Diagrama de Ishikawa o de espina de pescado. Fuente: Mora (2005)

2.3.4. Modos de fallos y análisis de causas y efectos (FMECA).

Según Durán y Gamboa (2008), al realizar un FMECA, se debe recordar que, la falla la define la función que se desea que el equipo cumpla y ha sido cumplida. Cada modo de falla debe ser evaluado respecto a sus efectos, no solo a su nivel, sino, que se deben observar sus efectos a un nivel inmediato superior, es recomendable observar sobre dos niveles superiores, de esta manera, podremos estar seguros del verdadero impacto de una falla funcional. Se trata de una herramienta de amplio valor, permitiendo clasificar las fallas según sus consecuencias, determinar el tipo de mantenimiento a aplicar y determinar las tareas por omisión.

Según Kardec y Nascif (2002), en la determinación del riesgo de una falla de un componente particular de un equipamiento, el grupo que efectúa el FMECA debe adoptar la siguiente secuencia de trabajo:

- a) Aislar y describir el modo de la falla potencial.

usuario debe tomar decisiones para elegir un equipo entre varias alternativas, (O’Conor, 2002).

En la figura 2.3 se observan los principales pasos que nos brinda la metodología de la Confiabilidad – Mantenibilidad – Disponibilidad (CMD) para el cálculo de las diferentes disponibilidades, para ello se utiliza el perfil de funcionabilidad. Desde el punto de funcionabilidad un sistema recuperable fluctúa entre el estado de funcionamiento (SoFu) y el estado de falla (SoFa) durante su vida operativa hasta su baja. El perfil de funcionabilidad muestra los estados del sistema durante un proceso de uso y normalmente se usa el tiempo calendario como unidad de tiempo operativo en la representación del perfil.

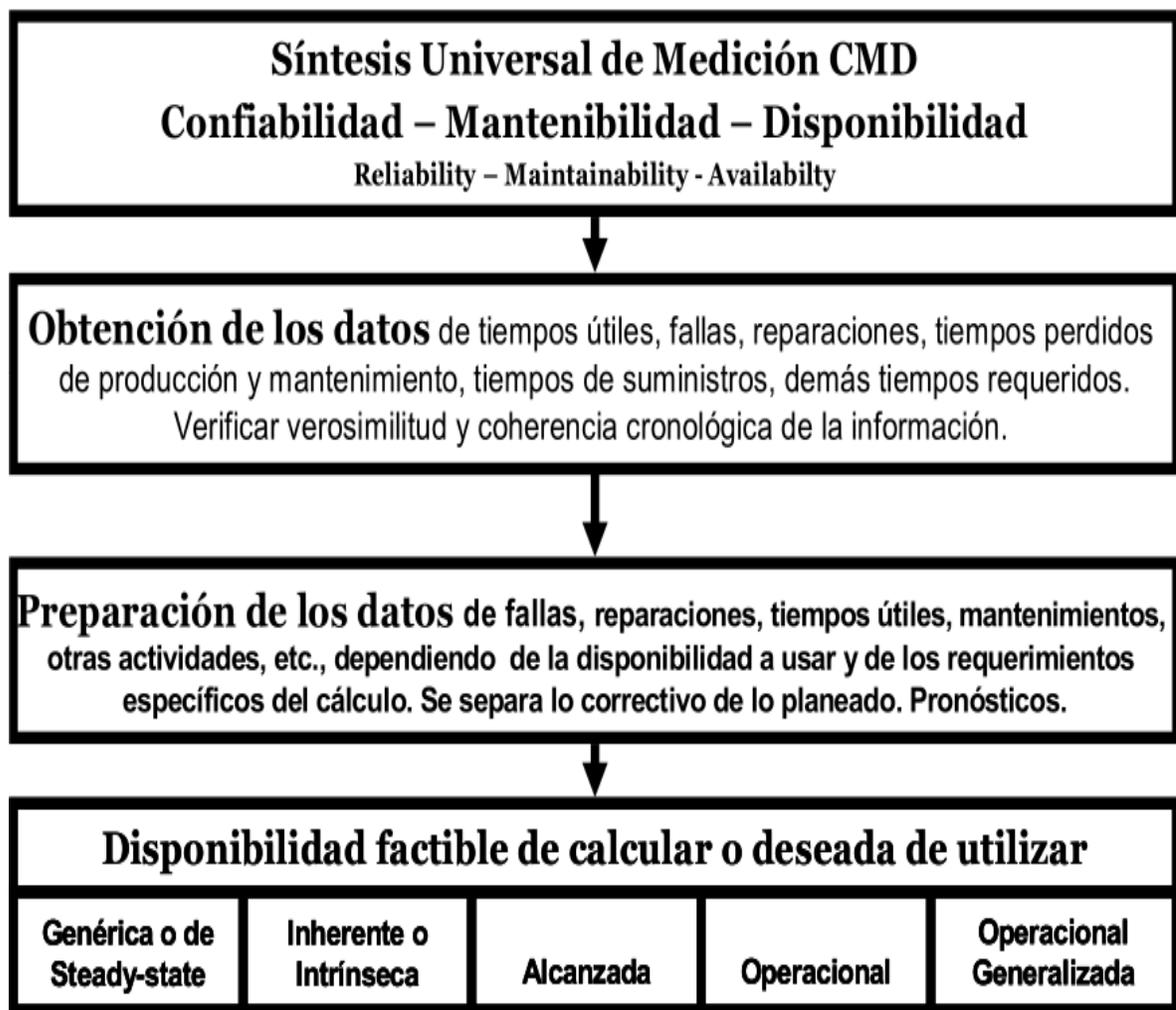


Figura 2.3. Pasos para efectuar el cálculo de las Disponibilidades. Fuente: Mora (2005).

A la hora de efectuar el cálculo de las diferentes disponibilidades, según la metodología propuesta por Mora (2005), es necesario tener en cuenta los factores que intervienen en cada una de ellas, los cuales se muestran en la tabla 2.3.

Tabla 2.3. Factores que inciden en el cálculo de la disponibilidad. Fuente: Mondelo (2014).

Tipos de Disponibilidades	Factores que inciden en la Disponibilidad de un equipo o sistema					
	Tiempo de no disponibilidad (DT)	Reparación Correctiva (TTR)	Mantenimientos (PM)	Tiempos administrativos (ADT)	Retrasos Logísticos (LDT)	Ready Time (RT)
Genérica	Si	No	No	No	No	No
Inherente	No	Si	No	No	No	No
Alcanzada	No	Si	Si	No	No	No
Operacional	No	Si	Si	Si	Si	Si

2.4.1. Cálculo de la Disponibilidad Genérica.

En la Disponibilidad Genérica el tiempo medio de funcionamiento solo considera los tiempos en que el equipo funciona correctamente, como a su vez los tiempo medios de no operatividad contemplan todo lo que genere no disponibilidad, tanto mantenimientos correctivos como planeados, los tiempos de paradas previstas o planeadas por mantenimiento deben descontarse del tiempo en que el equipo puede operar, este tipo de Disponibilidad se determina mediante la ecuación 2.3.

$$A_G = \frac{MUT}{MUT + MDT} \tag{2.3}$$

Donde:

A_G – Disponibilidad Genérica

MUT – tiempo medio de funcionamiento entre fallas

MDT – tiempo medio de Indisponibilidad

El tiempo útil de funcionamiento entre fallas se determina por la expresión 2.4

MTTR – tiempo neto medio para realizar reparaciones o mantenimientos correctivos, sin incluir demoras logísticas ni retrasos administrativos.

M_p – tiempo neto medio para ejecutar tareas proactivas de mantenimientos planeados.

\overline{M} – tiempo medio de mantenimiento activo requerido para realizar cualquier tarea de mantenimiento.

2.4.4. Cálculo de la Disponibilidad Operacional.

La Disponibilidad Operacional difiere de la alcanzada en que se tiene en cuenta los tiempos concernientes a los retrasos logísticos o administrativos y se expresa mediante la ecuación 2.12.

$$A_o = \frac{MTBM}{MTBM + \overline{M}'} \quad 2.12$$

Donde:

\overline{M}' - Se calcula por la expresión 2.11, lo que al momento de calcular el MTTR no solo se toman los correspondientes TTR1, TTR2, TTR_n, también se le suman respectivamente sus tiempos logísticos de demora para la realización de mantenimiento o reparación.

2.5. Procedimiento de medición y caracterización de las bombas de circulación.

Según Palomino (2001), el movimiento físico de una máquina rotatoria se interpreta como una vibración cuyas frecuencias y amplitudes tienen que ser cuantificadas a través de un dispositivo que convierta éstas en un producto que pueda ser medido y analizado posteriormente. Así la frecuencia describirá lo que está mal en la máquina, y la amplitud cuan severo es el problema.

Para realizar la caracterización de las bombas de circulación atendiendo a los patrones vibracionales, se siguen los requerimientos planteados en la norma NC-ISO 10816-3 la cual estipula las mediciones *in situ* de las vibraciones en las máquinas con potencia superior a 15 kW. Los procedimientos generales descritos en esta norma deben ser usados sujetos a las siguientes recomendaciones:

- Instrumentos de medición

- Puntos de medición
- Condiciones de operación

2.5.1. Instrumento de medición

El instrumento de medición que se utilizará es el Vibxpert II (figura 2.4), el cual es de fabricación alemana por la compañía Pruftechnik. Posee una pantalla VGA de 115 x 78 mm a color y de alta resolución (480 x 640 pixels). Este es un analizador de dos canales, con rango de frecuencia de 1Hz hasta 40 kHz y 102,400 líneas de resolución, mide valores globales de: aceleración, velocidad, desplazamiento, impulso de choque, revoluciones por minuto, temperatura, señales de corriente directa y corriente alterna, para análisis espectral en motores (datos de procesos) y fase.



Figura 2.4. Vibxpert II

Con este equipo se tomarán las mediciones de las vibraciones de forma off – line, se almacenarán los datos y luego se relacionarán los patrones de vibraciones con los momentos de falla, logrando establecer de esta manera patrones de referencia que permitirán descartar los síntomas de la ocurrencia de un modo de falla.

2.5.2. Puntos de medición

Según la norma NC – ISO 10816 – 1, habitualmente las mediciones se toman en partes expuestas de la máquina que normalmente resultan accesibles. Se debe tener el cuidado de asegurar que las mediciones representen razonablemente las vibraciones en el alojamiento del cojinete y que no incluyan resonancias o amplificaciones locales. La ubicación y

dirección para las mediciones de vibraciones serán aquellas que proporcionen la sensibilidad adecuada a las fuerzas dinámicas de la máquina. Los transductores pueden ser colocados en cualquier posición angular en los alojamientos o pedestales de los cojinetes. Teniendo en cuenta lo antes planteado, los puntos de mediciones en las bombas de circulación se encontrarán en la superficie del cojinete de contacto plano de empuje y en la parte superior de la camisa de la bomba, para una mejor visualización dichos puntos se muestran en el anexo A - 25.

2.5.3. Condiciones de operación

Las mediciones serán llevadas a cabo cuando el rotor y los cojinetes principales hayan alcanzado sus temperaturas normales de operación estable y con la máquina operando bajo condiciones especificadas, como por ejemplo, a cierta velocidad, voltaje, flujo, presión y carga. En máquinas con velocidades o cargas variables, las mediciones serán hechas bajo todas las condiciones a las cuales se espera que la máquina pueda operar por períodos prolongados. El máximo valor medido bajo estas condiciones será considerado como el representativo de la severidad de las vibraciones.

Si la vibración medida resulta mayor que los criterios de conformidad y se sospecha un excesivo nivel de vibraciones de fondo, entonces se efectuarán mediciones de vibraciones con la máquina detenida para determinar el grado de influencia externa. Si la vibración medida con la máquina detenida excede el 25% del valor medido cuando la máquina está en operación, entonces puede ser necesario tomar acciones correctivas para reducir el efecto de la vibración de fondo, (O'Conor, 2002).

2.6. Requerimientos para el monitoreo on – line.

De la Torre (2013), indica que la aplicación del monitoreo on – line debe responder principalmente a la criticidad de la máquina a monitorear, donde, en la cual el costo por parada de producción supera el costo de la tecnología. En este sentido es necesario tener en cuenta la importancia que posee el equipo en cuestión para la producción, la seguridad ambiental y para la vida humana. Por otra parte es necesario tener en cuenta la complejidad del diagnóstico del equipo en mal funcionamiento.

En el monitoreo on – line de las vibraciones, la comprensión e interpretación de los patrones de vibraciones, desempeñan un rol fundamental, lo cual se logra mediante la identificación de patrones característicos. Para lograr la identificación de estos patrones se debe conocer la frecuencia fundamental, la cual se define por la ecuación 2.13.

$$f_0 = \frac{n}{60}, \text{ Hz.} \quad \dots \quad 2.13$$

Donde:

n – velocidad de rotación del rotor de la bomba, min^{-1}

Conociendo esta frecuencia, en dependencia de su amplitud, se pueden diferenciar los patrones unos de otros. Otra frecuencia de interés es la frecuencia de paso de aspa que se define por la expresión 2.14.

$$F = f_0 \cdot N, \text{ Hz.} \quad \dots \quad 2.14$$

Donde:

N – número de aspás.

2.6.1. Posición de los transductores.

Según la Norma 13373 – 1, la posición de los transductores para cumplir eficientemente con el propósito de monitorear la condición depende fundamentalmente del tipo de máquina y de los parámetros a controlar. Antes de especificar las posiciones de cada uno de los transductores, primero es necesario identificar cuáles son los parámetros que deben monitorear, como por ejemplo:

- Vibraciones absolutas en los cojinetes
- Vibraciones relativas del rotor con respecto a los cojinetes
- Desplazamiento relativo del árbol respecto al cojinete durante el funcionamiento
- Desplazamiento absoluto del árbol

En general los transductores pueden posicionarse en la vecindad de los cojinetes, no obstante si la experiencia es confiable para un tipo particular de máquina podrían posicionarse en otras posiciones como las siguientes:

- a) En donde se obtengan mayores valores de vibraciones como acoplamientos
- b) En donde exista un pequeño huelgo entre las partes estáticas y las partes dinámicas y pueda dar lugar a la fricción

Teniendo en cuenta lo antes planteado, en el presente trabajo se recomienda utilizar la tabla del anexo A – 6, en el cual se encuentran las posiciones recomendadas para los transductores en bombas verticales y de enfriamiento.

2.7. Consideraciones para realizar la valoración económica y ambiental.

El costo de un sistema de monitoreo de parámetros de procesos, debe representar una pequeña fracción del costo total de la maquinaria crítica y similarmente menor que el costo de un día de producción perdida. El costo que pudiera ser justificado para el monitoreo permanente de la maquinaria crítica, varía ampliamente entre empresas consumidoras, lo normal es que se considere el 0,001 % del costo anual por pérdida de producción, como valor que pudiera ser justificado, para un sistema de monitoreo en máquinas críticas, (De la Torre, 2013).

Para el análisis de los costos a la hora de implementar un monitoreo on – line es necesario realizar las siguientes valoraciones:

- Costo de la maquinaria
- Costo de interrupción
- Costo de reparación
- Costo de una avería catastrófica
- Costo de afectación al medio ambiente
- Costo de afectación a la vida humana
- Costo de afectación a otras máquinas

prevención de los daños que ocasionan éstos fenómenos a la salud del hombre y al medioambiente.

2.8. Conclusiones del Capítulo.

1. Quedan expuestas las metodologías de las principales herramientas del mantenimiento a nivel mundial, así como la del cálculo de las Disponibilidades.
2. Se seleccionó el VIBXPERT II como el equipo a utilizar para realizar las mediciones que permitirán caracterizar mediante patrones de referencias el objeto de estudio.

CAPÍTULO 3

CAPÍTULO 3: ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

3.1. Introducción

La ejecución de un mantenimiento, independientemente del tipo y la magnitud que sea, siempre figura esquivada en la decisión de los directivos. Por razones notablemente obvias, suspender un porcentaje o totalmente la producción a causa de efectuar un determinado mantenimiento, presupone poseer datos convincentes que reflejen claramente la necesidad imperante de un determinado mantenimiento.

Los resultados técnicos y económicos constituyen los principales indicadores de la eficiencia en cualquier proceso productivo a nivel internacional, en especial en nuestro país, el cual se encuentra enfrascado en una batalla económica en pos de lograr una producción eficiente en todas las esferas. Es por ello que el presente capítulo tiene como **objetivo** exponer los resultados del procedimiento planteado anteriormente y realizar una valoración económica del sistema de mantenimiento por diagnóstico propuesto al objeto de estudio así como su impacto al medio ambiente.

3.2. Resultados de las Herramientas del Mantenimiento.

Los datos que arrojan la aplicación de las Herramientas del Mantenimiento en las bombas de circulación, representan los rieles conductores de la estrategia de mantenimiento a trazar en estos equipos. Su interdependencia es notoria y su fusión nutre de una única herramienta convincente que justifica a la vista de los directivos ejecutar la estrategia correcta de mantenimiento.

Es necesario recalcar que la interpretación de los resultados debe realizarse en un trabajo mancomunado, donde la columna vertebral del debate sea la fusión de experiencia y conocimiento, permitiendo a través de una tormenta de ideas hilvanar la estratagema que más se adecue al equipo o sistema en cuestión.

3.2.1. Resultados del análisis de Criticidad

Luego de realizadas las encuestas reflejadas en la tabla 2.2, analizados los puntajes en cada una de ellas y haciendo uso de la guía mostrada en la tabla 2.3 y de la ecuación 2.1, los resultados del análisis se muestran en la tabla 3.1.

Tabla 3.1. Resultados de las encuestas de Criticidad.

Equipos	Nivel de producción	Frecuencia de falla	Impacto en la producción	TPPR	Costo de Reparación	Impacto seguridad	Impacto ambiental	Criticidad
Bombas de Circulación	4	3	0,5	6	25	0	0	111
Bombas de Vacío	0	6	0,05	2	3	0	0	18
Bombas de Enfriamiento	0	3	0,05	4	5	0	0	15
Bombas de Enfriamiento Estatórico	0	1	0,05	4	3	0	0	3

Para una mejor visualización de los resultados, se puede observar en la figura 3.1 las tres zonas de criticidad.

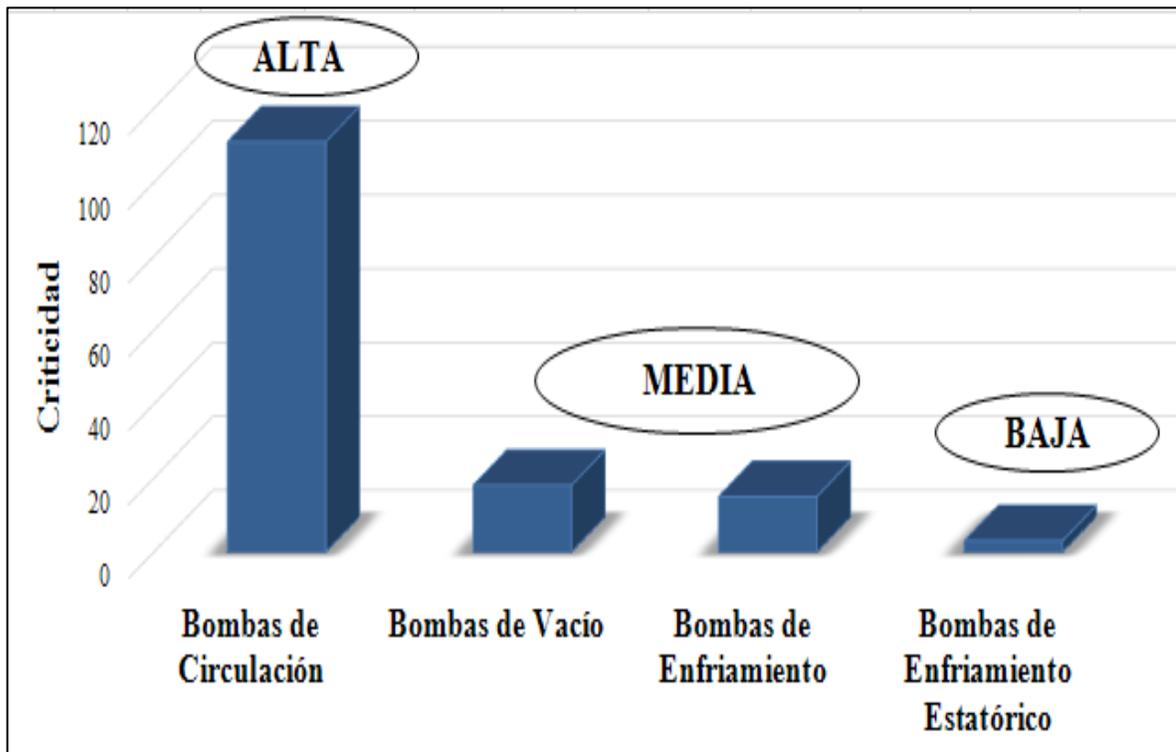


Figura 3.1. Zonas de Criticidad en el subsistema de enfriamiento del turbo grupo dos.

Como se puede observar en la anterior figura las bombas de circulación figuran notablemente como los equipos más críticos del subsistema de enfriamiento lo cual justifica una especial atención a estos equipos.

3.2.2. Resultados del Diagrama de Pareto.

Para la confección del Diagrama de Pareto primero es necesario establecer la Matriz de parámetros óptimos, la cual se muestra en la tabla 3.2.

Tabla 3.2. Matriz de Parámetros Óptimos de las bombas de circulación.

MATRIZ DE FALLA O PARAMETROS ÓPTIMOS							
Principales Fallas	Variables de Diagnóstico						
	Vibraciones	Temperatura	Corriente	Ruido	Análisis Aceite	Nivel del Canal	
Roce mecánico	X	X	X	X			
Holgura del buje	X						
Cojinete en mal estado	X			X			
Alta temperatura en rodamiento		X					
Obstrucción del sistema de enfriamiento		X					
Tacos de acoplamiento en mal estado	X						
Desalineamiento	X						
Suciedad en filtros	X		X				
Contaminación del aceite		X			X		
Salidero por preense							
Eje flectado	X						
Alto amperaje del motor	X	X	X				X
Deformación en paletas	X						
Desbalance en impelente	X						
Tornillería de la base con soldadura	X			X			
Anillo de inserción de la bomba con soldadura	X						
Cavitación en bomba	X						X
Filtros de las descargas de la bomba con	X						

En la tabla 3.3 se muestran las consecuencias individuales y acumuladas de la matriz anterior, así como sus porcentajes correspondientes.

Tabla 3.3. Consecuencias individuales y acumuladas con sus porcentajes.

Variables de diagnóstico	Consecuencias individuales	Consecuencias acumuladas	Porcentaje individual	Porcentaje Acumulado
Vibraciones	14	14	50,00	50,00
Temperatura	5	19	17,86	67,86
Corriente	3	22	10,71	78,57
Ruido	3	25	10,71	89,29
Nivel del Canal	2	27	7,14	96,43
Calidad de aceite	1	28	3,57	100,00

En las figuras 3.2 y 3.3 se muestran los diagramas de Pareto haciendo uso de los datos de la tabla anterior.

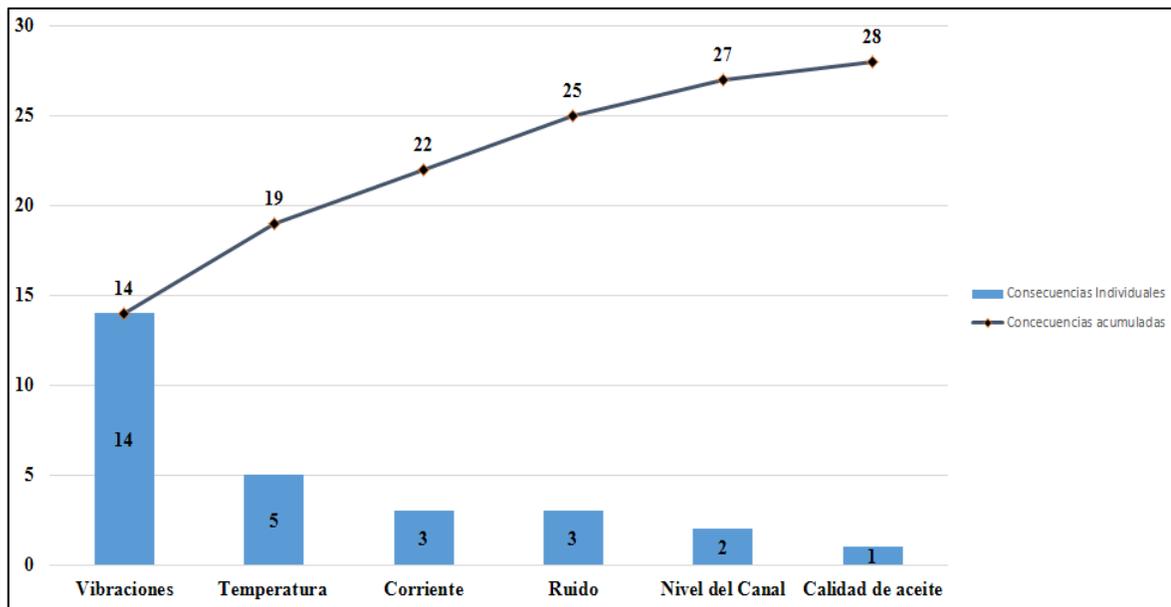


Figura 3.2. Pareto para las consecuencias individuales y acumuladas.

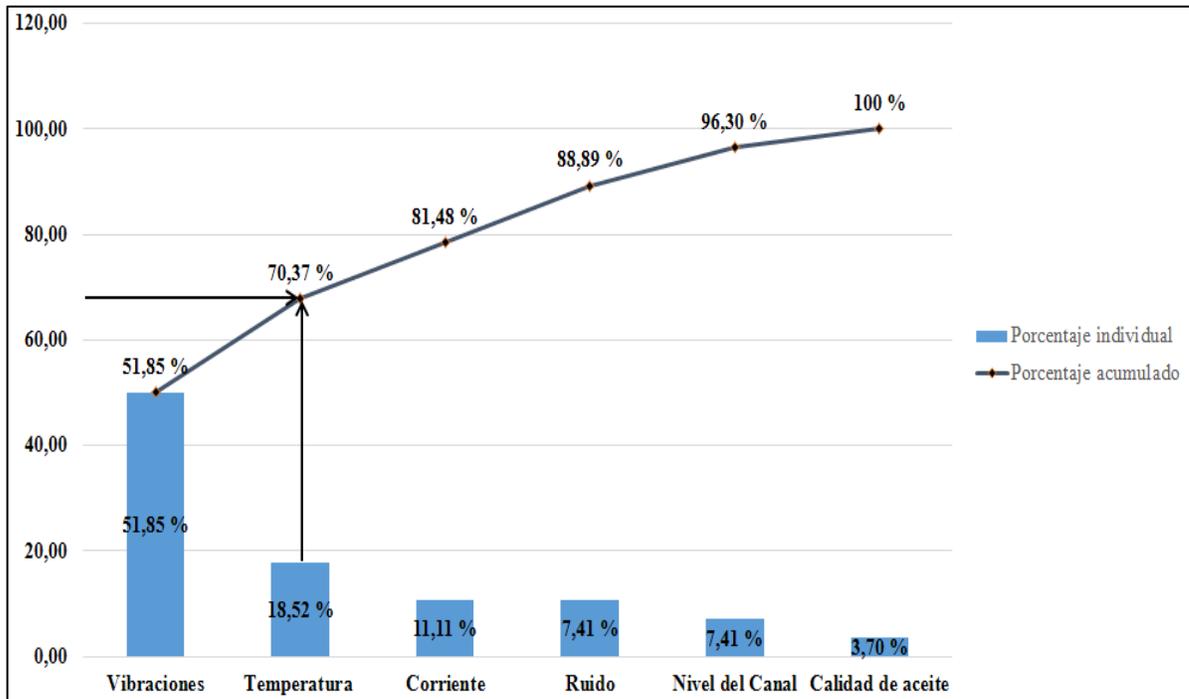


Figura 3.3. Pareto porcentual.

En el último diagrama se puede observar como las vibraciones y la temperatura son las variables de diagnósticos que constituyen los pocos vitales que relejan la ocurrencia de la mayoría de los modos de fallas en las bombas de circulación. Dicho de otra forma, las vibraciones y la temperatura constituyen aproximadamente el 20 % de las causas que generan alrededor del 80 % del defecto.

3.2.3. Resultados del Diagrama de Ishikawa.

Para establecer el Diagrama de Ishikawa se toma como efecto – consecuencia el fallo del conjunto bomba – motor, los factores causantes potenciales constituyen la falla del motor y de la bomba respectivamente, las áreas potenciales las representan los valores de las principales variables de diagnósticos en los elementos fundamentales del equipo: vibraciones, temperaturas y amperaje; las causas potenciales constituyen fundamentalmente incumplimientos de una determinada normativa, envejecimiento de determinados elementos, deterioro de componentes por la influencia del medioambiente, entre otros. Para mejor entendimiento el Diagrama de Ishikawa de las bombas de circulación se muestra en la figura 3.4.

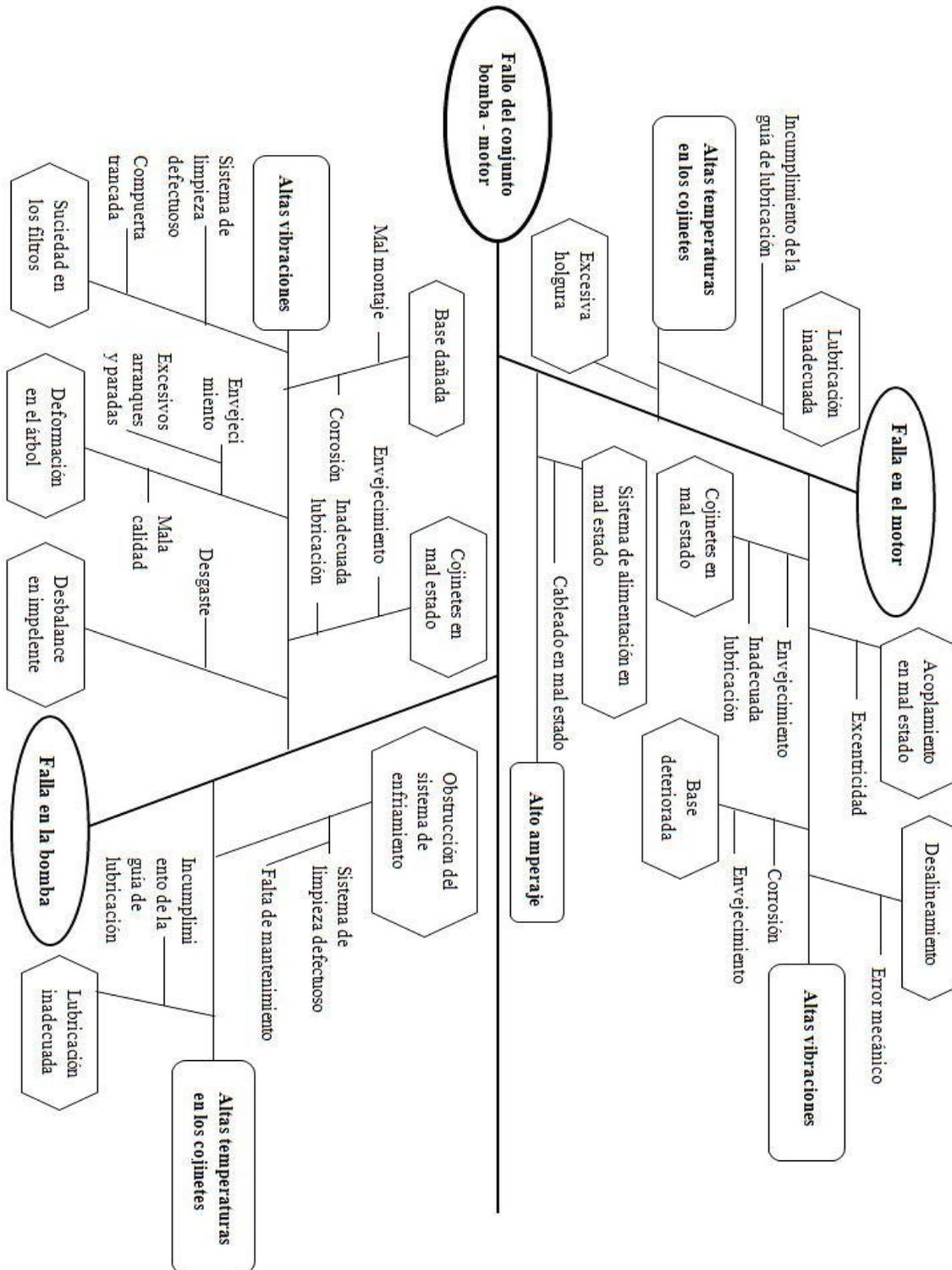


Figura 3.4. Diagrama de Ishikawa de las bombas de circulación.

3.2.4. Resultados de los Modos de fallos y análisis de causas y efectos (FMECA).

La tabla que recoge el FMECA de las bombas de circulación de agua de mar se muestra en el anexo A – 11, en la misma se puede observar que se identificaron 11 fallas funcionales fundamentales, cada una sus modos de fallas correspondientes. Los Números de Prioridad del Riesgo de cada una de las fallas utilizando la ecuación 2.2 se pueden comparar haciendo uso de la siguiente figura 3.5.

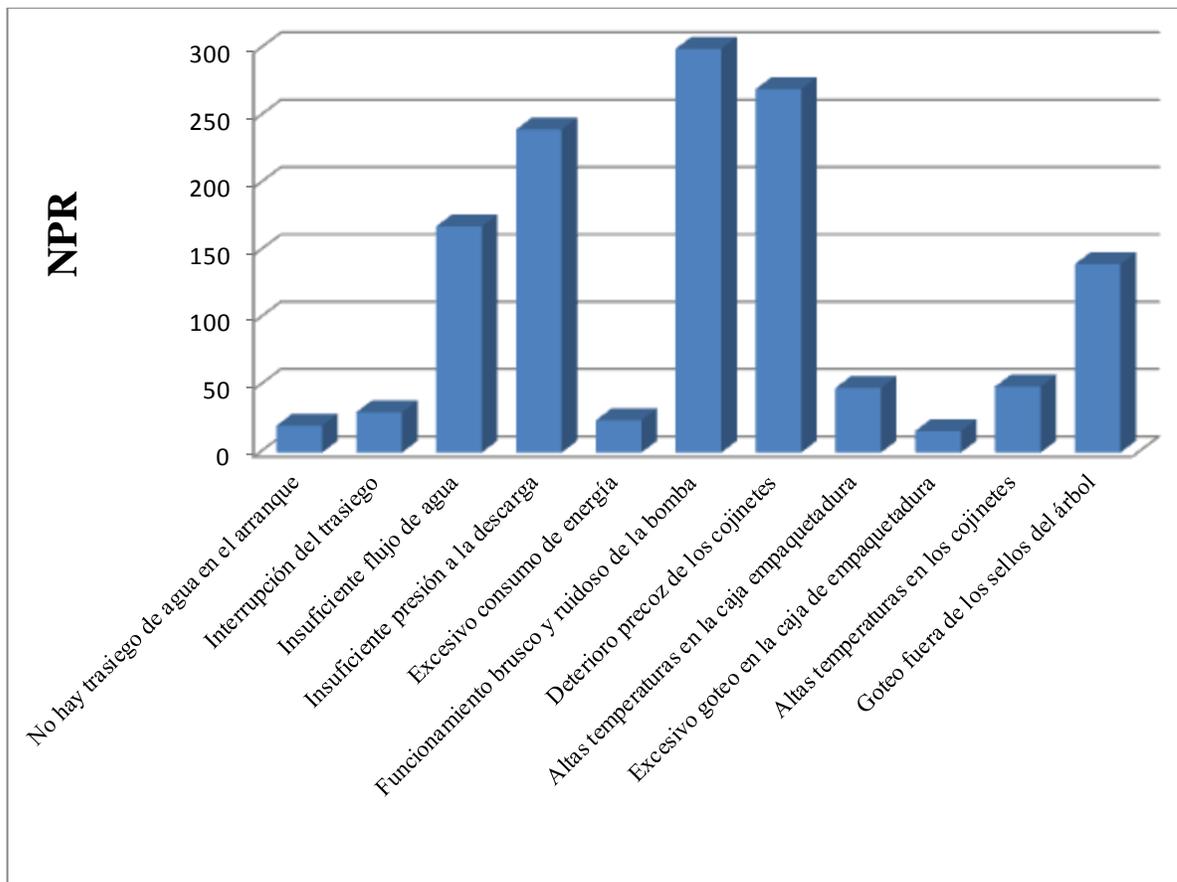


Figura 3.5. NPR de cada Falla funcional.

En la anterior figura se puede observar como el funcionamiento brusco y ruidoso de la bomba constituye la falla que mayor NPR posee, es decir que representa la falla principal en el equipo en cuestión. Es necesario aclarar que existen fallas que son de igual o mayor gravedad que la antes mencionada, pero influye determinadamente que no es tan sencillo detectar el funcionamiento brusco y ruidoso de la bomba, ya que la misma se encuentra por debajo del nivel cero de la planta.

3.3. Resultados del cálculo de las Disponibilidades.

Según las ecuaciones 2.3, 2.4, 2.5, 2.6, 2.7, 2.8, 2.9, 2.10, 2.11 y 2.12, los resultados de los tipos de disponibilidades se muestran en la tabla 3.4.

Tabla 3.4. Resultados de las Disponibilidades.

Disponibilidades	Valor (%)
Genérica	85,34
Inherente	89,67
Alcanzada	84,94
Operacional	83,77

Los perfiles de funcionalidad de cada una de las disponibilidades se muestran en los anexos A – 7, A – 8, A – 9 y A – 10. Para una mejor visualización en la comparación de estos valores, los mismos se muestran en la figura 3.6.

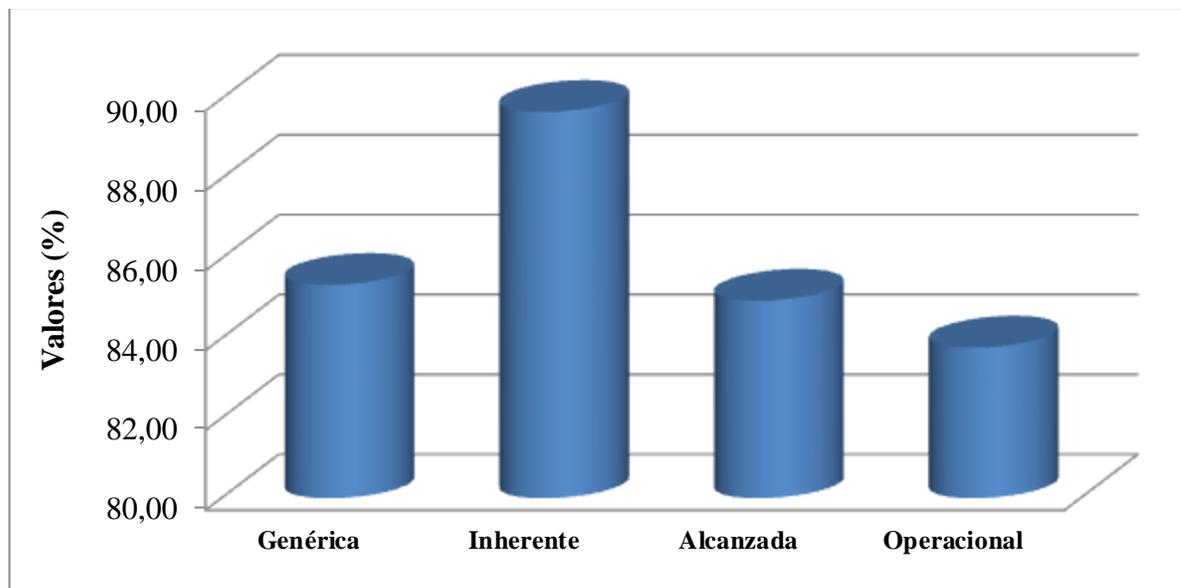


Figura 3.6. Resultados de las Disponibilidades.

De los resultados anteriores se puede esgrimir que la Disponibilidad que posee el mayor valor es la Inherente, por lo cual se puede afirmar que las razones de falla y de reparación no son las que más afectan la disponibilidad del equipo. Por otra parte, la Disponibilidad Alcanzada y Operacional son las que alcanzan los valores menores, indicando de esta manera que los valores promedios imputables a los tiempos de mantenimientos y entre mantenimientos,

influyen determinadamente en la Disponibilidad del equipo. Los tiempos de retrasos debidos a problemas logísticos o administrativos aumentan notablemente los tiempos pertenecientes a los mantenimientos, indicando de esta manera ineficiencia del aparato logístico – administrativo a la hora de ejecutar los mantenimientos.

3.4. Caracterización de las bombas de circulación 2VC01 y 2VC11.

Para lograr la caracterización de las bombas en cuestión se parte de realizar el análisis de tendencia de los valores absolutos de las vibraciones en sus dos puntos de medición registradas mensualmente desde la puesta en marcha de estos equipos.

El gráfico de tendencia de las vibraciones absolutas de la bomba 2VC11 se muestra en la figura 3.7.

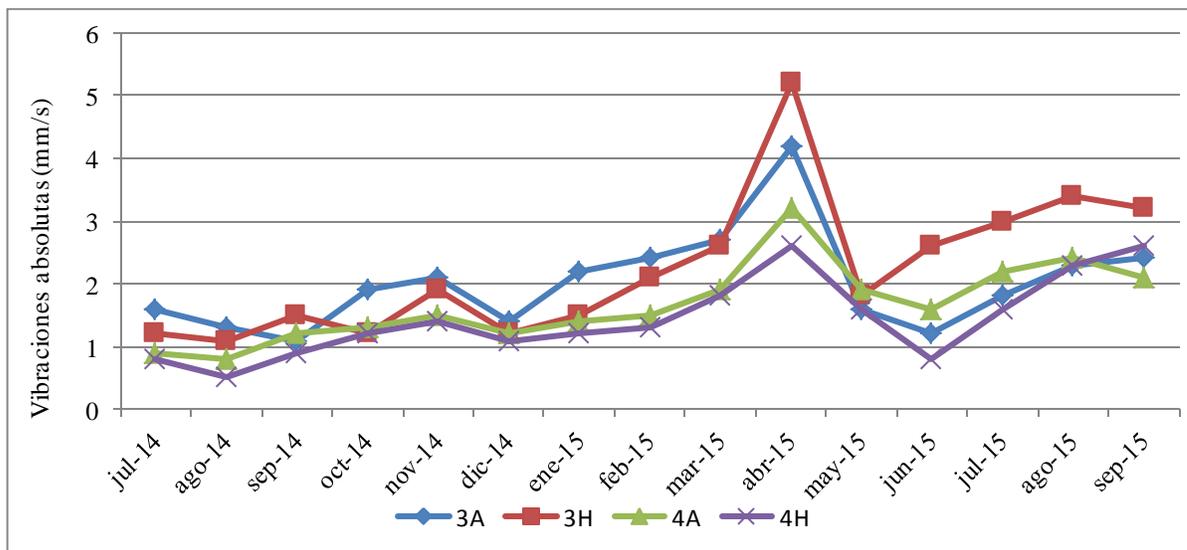


Figura 3.7. Análisis de tendencia de las vibraciones absolutas de la bomba 2VC11.

En la figura 3.10 se puede observar como en el período comprendido de marzo a abril constituye el más crítico alcanzando valores superiores a los 4 mm / s siendo necesaria la salida del equipo de la línea de producción para su correspondiente reparación alcanzando valores normales de funcionamiento. Luego de este período es visible un notable incremento de las vibraciones indicando la ocurrencia de nuevos modos de fallas.

El gráfico de tendencia de las vibraciones absolutas de la bomba 2VC01 se muestra en la figura 3.8.

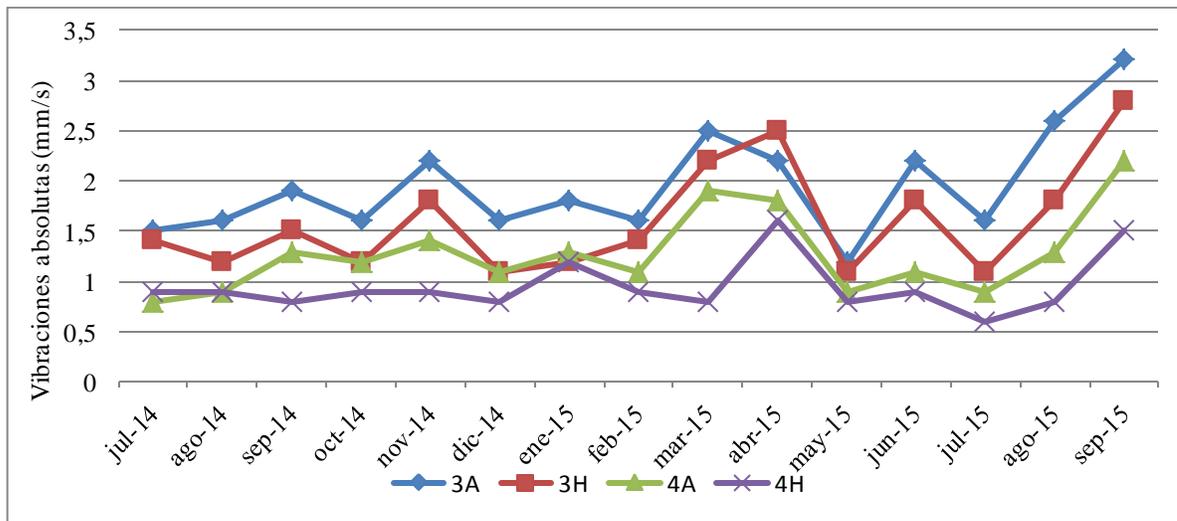


Figura 3.8. Análisis de tendencia de las vibraciones absolutas de la bomba 2VC01.

En este gráfico se puede observar que esta bomba posee un mejor comportamiento que su homóloga, no obstante es notable el incremento de los valores de las vibraciones a partir del mes de agosto del 2015 lo que trae consigo la intensificación de estos valores siendo inevitable la salida de línea de la bomba en septiembre del 2015.

Atendiendo a que los niveles globales de vibraciones no siempre son el mejor indicador del estado de un equipo, se procede a la descripción de los patrones de referencias característicos de las bombas de circulación. El patrón de referencia que indica buen comportamiento en la dirección axial es el que se muestra en la figura 3.9.

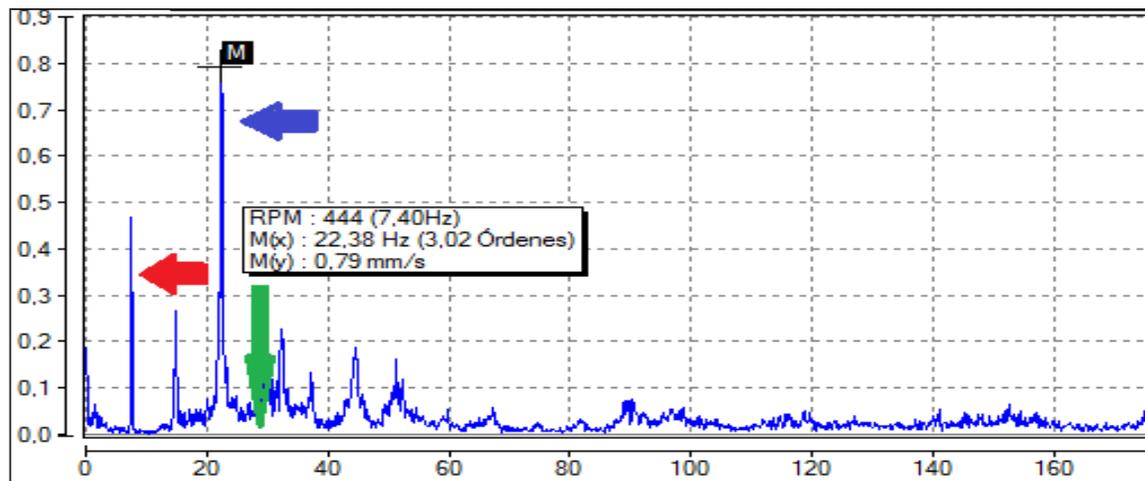


Figura 3.9. Patrón de buen comportamiento en la dirección axial.

Para facilitar el análisis y comprensión de los patrones de referencia es necesario conocer los valores de la frecuencia fundamental y la de paso de aspa, los cuales según las ecuaciones 2.13 y 2.14 son 7,41 Hz y 22,25 Hz respectivamente. Para la identificación de estas frecuencias se utiliza la siguiente leyenda:

➔ Frecuencia fundamental
 ➔ Frecuencia de paso de aspa
 ➔ Componentes no armónicos

En la figura 3.9 se puede observar que la frecuencia dominante es la de paso de aspa, la cual posee un valor discreto de 0,79 mm / s. La frecuencia fundamental posee una amplitud cercana a los 0,5 mm / s. Por otra parte se puede señalar en el espectro la presencia de componentes armónicos hasta un noveno orden (9x) y de componentes no armónicos excitados en forma de montículos.

En este sentido, el patrón de buen comportamiento en la dirección horizontal de la bomba se muestra en la figura 3.10.

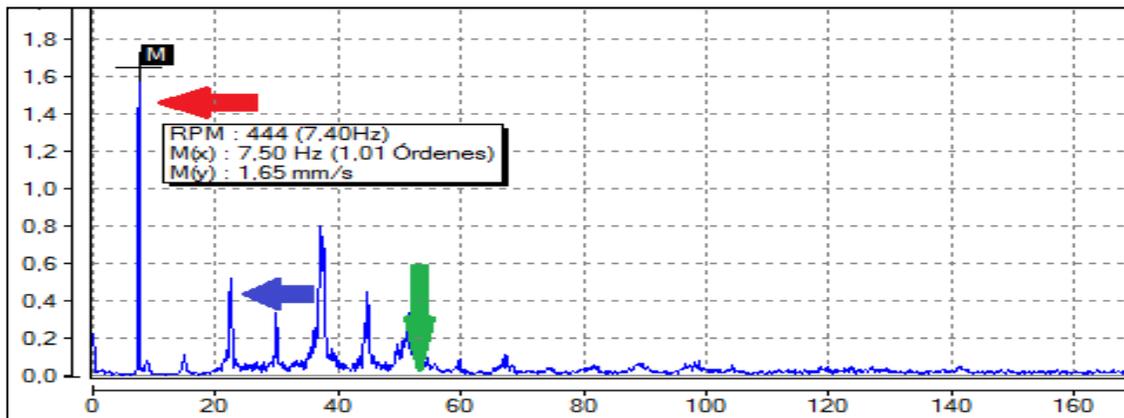


Figura 3.10. Patrón de buen comportamiento en la dirección radial.

En el espectro de la figura 3.10 se puede observar que la frecuencia dominante es la frecuencia fundamental con una amplitud de 1,65 mm / s, la frecuencia de paso de aspa alcanza valores cercanos a los 0,5 mm / s. Las frecuencias armónicas se encuentran excitadas hasta un noveno orden con la presencia de componentes no armónicos en forma de montículos.

Por otra parte, en el período en que las bombas han alcanzado los máximos valores absolutos de vibraciones es debido a la ocurrencia de los siguientes modos de fallas:

- Desgaste en el anillo de trabajo

- Impelente dañado
- Cojinete de contacto plano inferior dañado

El patrón de referencia relacionado con los anteriores modos de fallas en la dirección axial, se muestra en la figura 3.11.

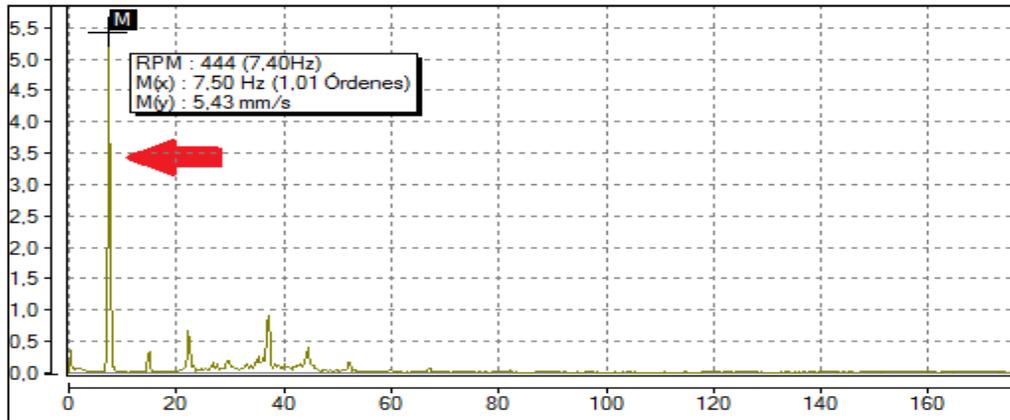


Figura 3.11. Patrón de mal comportamiento en la dirección axial.

En la figura anterior se puede observar que la frecuencia predominante es la fundamental con valores superiores a los 5 mm / s, las frecuencias armónicas se encuentran excitadas hasta un séptimo orden con valores apenas insignificantes.

En este sentido el patrón de referencia en la dirección radial es el que se muestra en la figura 3.12.

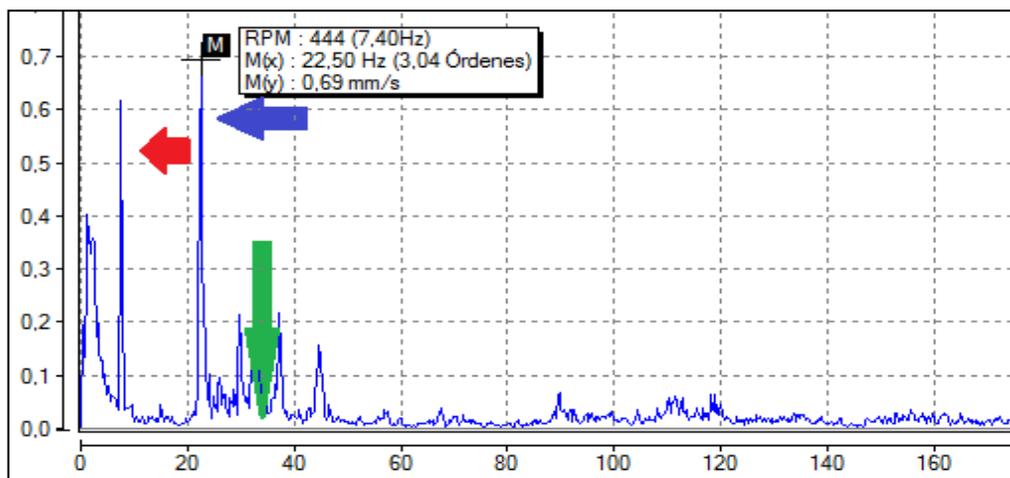


Figura 3.12. Patrón de mal comportamiento en la dirección radial.

En el espectro de la figura 3.12 la frecuencia dominante es la frecuencia de paso de aspa con una pequeña amplitud cercana a los $0,7 \text{ mm / s}$, las frecuencias armónicas se encuentran excitadas hasta un sexto orden con presencia de componentes no armónicos en forma de montículos con amplitudes despreciables.

El resto de los patrones que relacionan los otros modos de fallas se encuentran en los anexos del A – 12 al A – 23.

Para el control y seguimiento de los patrones vibracionales de referencia de las bombas de circulación, así como de los valores globales de las vibraciones se utilizará la tabla de severidad que se muestra en el anexo A – 24. En la referida tabla se puede apreciar que las bombas de circulación pertenecen al grupo tres con base rígida, para los cuales se establece que a partir de $4,5 \text{ mm / s}$ de valores globales de vibraciones comienza la señal de alarma, mientras que cuando alcanzan valores superiores a los $7,1 \text{ mm / s}$ comienza la señal de disparo.

3.5. Establecimiento del monitoreo on – line en las bombas de circulación.

Para el establecimiento del monitoreo on – line en las bombas de circulación se puede aprovechar la existencia del VC – 4000, el cual es el equipo que se utiliza en la monitorización de las turbinas de la empresa y posee cuatro racks disponibles que no se han utilizado hasta el momento, el mismo se muestra en la figura 3.13.



Figura 3.13. VC – 4000.

Los sensores que se utilizarán son acelerómetros del modelo AS – 30, el cual se muestra en la figura 3.14.

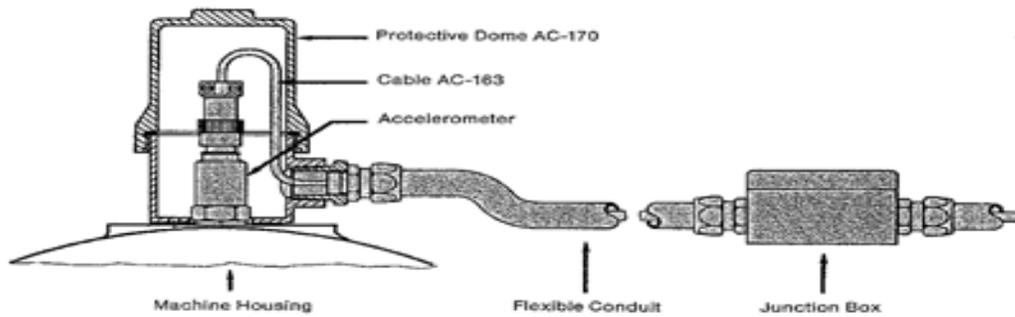


Figura 3.14. Acelerómetro AS – 30.

Los datos técnicos de este sensor se muestran en la tabla 3.5.

Tabla 3.5. Datos técnicos del acelerómetro AS – 30.

Sensibilidad	100 m · V / g ± 5 %
Desviación de la sensibilidad debido a la temperatura	- 22 °C: - 3 % 25 °C: 0 % 65 °C: + 2,5 % +120 °C: +5,5 %
Rango de frecuencia	4 ÷ 10000 Hz (± 0,5 dB) 1,5 ÷ 15000Hz (± 3 dB)
Peso	70 g (2,8 oz)
Temperatura de operación	- 50 °C ÷ 120 °C

La posición y la cantidad de sensores se seleccionaron de acuerdo a la norma 13373 – 1, por lo cual se establece que cada bomba tendrá un total de cuatro sensores cada una para realizar las mediciones en tres puntos:

1. Parte superior del motor (solo en la dirección radial)
2. Parte inferior del motor (solo en la dirección radial)
3. En el cojinete superior de la bomba (En ambas direcciones, axial y radial)

Para mejor visualización de las posiciones de los sensores en las bombas de circulación, las mismas se muestran en el anexo A – 26.

3.6. Valoración económica.

La valoración económica se realiza sobre la base de los costos de mano de obra con el Mantenimiento Preventivo Planificado y el Mantenimiento por Diagnóstico, así como el gasto de adquisición del sistema de monitoreo on – line en comparación con el costo total por avería.

3.6.1. Evaluación de los costos de mano de obra en el Mantenimiento Preventivo Planificado (MPP).

En el ciclo de reparación establecido en la instalación de las bombas de circulación muestra las acciones a realizar, el tiempo de intervención y el tiempo de reparación, el cual se comporta según la figura 3.15.

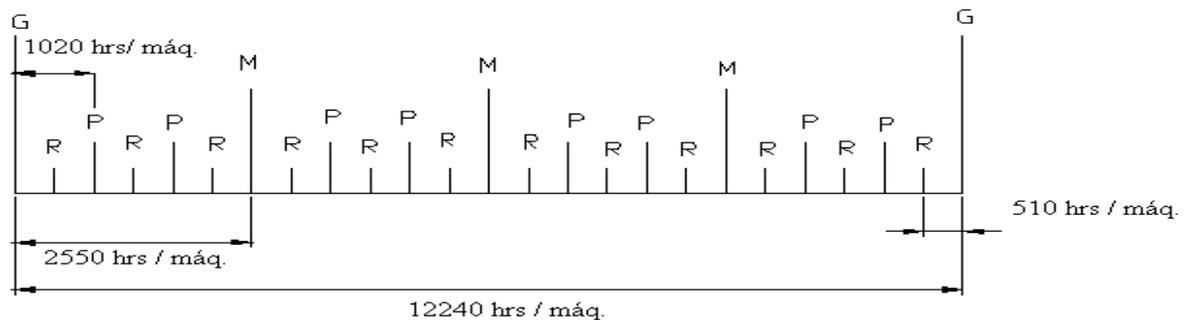


Figura 3.15. Ciclo del Mantenimiento Preventivo Planificado de las bombas de circulación.

En la anterior figura se puede apreciar que el ciclo posee una duración de 12240 horas, y cada 510 horas se realiza una determinada acción. El comportamiento de los costos del MPP en función de sus acciones, son reflejados en la tabla 3.6.

Tabla 3.6. Costos de las acciones del MPP en las bombas de circulación 2VC01 y 2VC11.

Acciones	Cantidad a Ejecutar	Importe (MN)
Revisión (R)	12	501
Reparaciones Pequeñas (P)	8	3870
Reparaciones Medianas (M)	3	5915
Reparaciones Generales (G)	2	11144
Costo Total de mano de obra de las Reparaciones	25	21430
Costo Total de mano de obra de la instalación	Para 2 bombas	42860

3.6.2. Estimación de los costos de mano de obra aplicando el mantenimiento por diagnóstico.

Con la aplicación del Mantenimiento por Diagnóstico se estima que las reparaciones pequeñas deben disminuir de ocho a cuatro, lo que representa un 50% y las revisiones aumentan en la misma proporción de 12 a 24 en un ciclo de reparación. En la figura 3.16 se muestra el ciclo correspondiente.

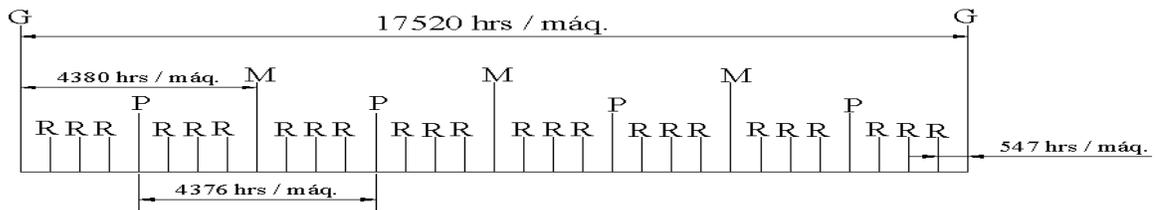


Figura 3.16. Ciclo de las acciones del Mantenimiento por Diagnóstico.

La estimación de los costos de las acciones del Mantenimiento por Diagnóstico se muestran en la tabla 3.7.

Tabla 3.7. Costos estimados de las acciones del Mantenimiento por Diagnóstico.

Acciones	Cantidad	Costo (MN)
Revisiones (R)	24	1002
Reparación pequeña (P)	4	1935
Reparación mediana (M)	3	3595
Reparación general (G)	1	8566
Costo Total		15098
Costo Total de la mano de obra la instalación para 2 bombas		30196

Analizando los costo de mano de obra del Mantenimiento Preventivo Planificado y el Mantenimiento por Diagnóstico, se estima un ahorro de 12664 MN lo que significa un ahorro del 29,54 % en mano de obra lo que prueba las ventajas que se logra con la aplicación del mismo.

3.6.3. Evaluación de los costos del sistema de monitorado on – line.

Según De la Torre (2013), para justificar la implementación de un sistema de monitorado on – line es necesario considerar que el costo del mismo represente valores cercanos al 1 % del

costo total por una avería. Para realizar este análisis económico se establecen los costos por una avería de 14 días de duración, los cuales contemplan los costos de reparación y los costos generados debido a la indisponibilidad, estos valores se muestran en la tabla 3.6.

Tabla 3.6. Costos por avería en las bombas de circulación.

Tipo de costo	Tasa (MN)
Reparación	5912,99
Energía dejada de generar	18816000,00
Sobreconsumo	195766,86
Indisponibilidad	19011766,86

Teniendo en cuenta la ecuación 2.13, el costo total por avería posee un valor de 19017679,85 MN, por otra parte, ocho acelerómetros modelo AS – 30 poseen un costo de 159012 MN y 2400 m de cable para su conexión cuestan 303030 MN, lo que constituyen un monto total para el sistema de monitoreo de 462042 MN, representando a su vez un 2,43 % del costo total por avería, siendo de esta manera válida la implementación del sistema de monitoreo.

3.7. Impacto ambiental.

Las bombas de circulación se encuentran situadas en la vecindad de la caldera, lo que contribuye a la elevación de los niveles de ruido, además estos equipos se encuentran soterrados, generando bajo el nivel cero valores superiores a los 80 dB. Por otra parte, en la caracterización del equipo se pudo constatar que las bombas han presentado altos valores globales de vibración cuando presentan alguna falla funcional, lo que implica que la permanencia en lugares cercanos a las bombas represente un riesgo a la salud del personal que labora en esta área.

Atendiendo a lo antes dicho se esgrime que las vibraciones y el ruido de las bombas de circulación constituyen los riesgos fundamentales al medioambiente. La prevención de los daños ocasionados por estos fenómenos constituye la esencia de lograr una Producción Más Limpia de estos equipos, por lo cual se establecen las siguientes medidas:

- Utilización de tapones de seguridad en los oídos cuando se radica bajo el nivel cero de las bombas de circulación, para proteger la membrana timpánica de los altos niveles de ruido que se generan en esta área.
- Limitar el tiempo de permanencia en las zonas cercana a las bombas de circulación en dependencia de los niveles globales de vibración como se estipula en el anexo A – 27, para evitar los padecimientos ocasionados por las vibraciones en el personal que frecuente estos equipos.
- Detener el funcionamiento de las bombas cuando presenten algún modo de falla, teniendo en cuenta que los niveles de vibraciones y ruido aumentan.
- Realizar mediciones periódicas en el objeto de estudio cada 15 días de los niveles de ruido para el control y seguimiento de los mismos.
- Realizarle el chequeo médico cada seis meses al personal que frecuenta en la vecindad de las bombas de circulación en pos de prevenir cualquier padecimiento.

3.8. Conclusiones del capítulo.

1. Las bombas de circulación constituyen los equipos más críticos del subsistema de enfriamiento, y el 70 % de sus principales fallas se detectan mediante los valores de la temperatura y los niveles globales de vibraciones.
2. El funcionamiento brusco y ruidoso de las bombas representa la falla funcional que mayor número de prioridad de riesgo posee con un valor de 300, lo que la figura como la principal falla de las bombas de circulación.
3. La caracterización del equipo permitió establecer patrones de referencias los cuales serán monitorizados mediante un sistema on – line que posee un costo total de 462042 MN, muy inferior a los 19011976,77 MN que representan el costo total por una avería de 14 días.
4. Las vibraciones constituyen el impacto ambiental fundamental de las bombas de circulación de agua de mar, causando diferentes trastornos a la salud del hombre, lo que implica la regulación del tiempo de exposición en la vecindad del objeto de estudio.

CONCLUSIONES GENERALES

CONCLUSIONES GENERALES

1. Se establecieron patrones vibracionales de referencia que permiten identificar los modos de fallas asociados a las bombas de circulación, teniendo en cuenta la frecuencia fundamental y la de paso de aspa con valores de 7,41 Hz y 22,25 Hz respectivamente.
2. El sistema de monitoreo on – line a implementar requiere de la adquisición de cuatro acelerómetros modelos AS – 30 para cada bomba y cuenta con la existencia del equipo VC – 4000 en la empresa para el seguimiento y control de los valores globales de vibración y de los patrones vibracionales.
3. La implementación del Mantenimiento por Diagnóstico genera un gasto de 462042 MN en instrumentación, lo que representa el 2,43 % de los 19017679,85 MN que cuesta una avería de 14 días, además se realiza un ahorro de 12664 MN en mano de obra con respecto al Mantenimiento Preventivo Planificado vigente en estos equipos.

RECOMENDACIONES

1. Realizar el cálculo verificativo de la red hidráulica asociada a las bombas de circulación 2VC01 y 2VC11.
2. Determinar la influencia que provocó el cambio del número finito de álabes, teniendo en cuenta que las bombas precedentes tenían cuatro y las actuales poseen tres.
3. Implementar el sistema de mantenimiento propuesto en las bombas de circulación 1VC01 y 1VC11.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Amendola, L. J. (2005). *Modelos Mixtos de Mantenimiento*. AMG.
2. Campbell, J. D. (2010). *The Reliability Handbook*. California: PricewaterhouseCoopers.
3. Castillo, A. (2006). *Estadística y fiabilidad en el mantenimiento*. La Habana: Pueblo y Educación.
4. De la Torre, F. (2013). *Monitorado de Máquinas Industriales*. La Habana: CEIM.
5. Díaz, Á. (1992). *Confiabilidad en mantenimiento*. Caracas: IESA, C.A.
6. Durán, J. (2005). *Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad*. The Woodhuose Partnership Ltd & The Institute Asset Management.
7. Durán, N. C., y Gamboa, E. (2008). *Aplicación de la Metodlogía FMECA*. Venezuela: Universidad Francisco de Miranda.
8. Fernández, P. (2003). *Bombas Centrífugas y Volumétricas*. Cantabria: Universidad de Cantabria.
9. González, A. H., y Hechevarría, L. (2002). *Metodología Para Seleccionar Sistemas de Mantenimiento*. Buenos Aires: Revista Club de Mantenimiento.
10. Kardec, A., y Nascif, J. (2002). *Mantenimiento, Función Estratégica*. Río de Janeiro: Qualitymark.
11. Knesevic, J. (1996). *Mantenibilidad*. Madrid: Isdefe.
12. Lahera, K. O. (2015). *Implementación de la gestión del mantenimiento po falla y criticidad del circuito hidráulico en máquinas de hemodiálisis*. Moa: ISMMM.
13. Martínez, L., y Jáuregui, J. (2007). *MECÁNICA DE LOS FLUIDOS Y MÁQUINAS DE FLUJO*. Las Villas: Universidad Central de las Villas.
14. Mendoza, R. H. (2010). *El análisis de criticidad, una metodología para mejorar la confiabilidad operacional*. Zulia: PDVSA.

15. Mondelo , R. H. (2014). *Propuestade rediseño para la monitorización on line por vibraciones del Turbogrupos # 2 de 250 MW de la Termoeléctrica Lidio Ramón Pérez*. La Habana: ISPJAE.
16. Mora, L. A. (2005). *Mantenimiento Estratégico para Empresas Industriales o de servicio*. Medellín: AMG.
17. Mora, L. A., y Pérez, A. (2010). *Control y medición bajo la metodología terotecnológica RAM (Reliability Availability Maintainability)*. Lima: Ponencia Congreso Internacional de Mantenimiento PERÚ.
18. Moubray, J. (1997). *Reliability Centered Maintenance II*. New York: Industrial Press Inc.
19. Nachlas, J. A. (1995). *Fiabilidad*. Madrid: ISDEFE.
20. Norma ISO 13733-3. (2002).
21. Palomino, E. (2001). *Elementos de Medición y Análisis de vibraciones en máquinas rotatorias*. La Habana: CUJAE.
22. Palomino, E. (2003). *Monitorado y Predicción, actualidad industrial*. La Habana: CEIM.
23. Picknell, J. V. (2011). *Is RCM the right tool for you?* California: PricewaterhouseCoopers.
24. Royo, J. A., y Torres, F. (2008). *Vibraciones e interpretación de datos*. Madrid: DIDYF Universidad de Zaragoza.
25. Suárez, E. (2008). *Metodología para el diagnóstico vibro - eléctrico de motores de inducción*. Moa: MINBAS.
26. Tavares, L. A. (2002). *Administración Moderna del Mantenimiento*. Rio de Janeiro: Universidad Federal de Río de Janeiro .
27. Tavares, L. A. (2006). *Administración del Mantenimiento*. Madrid: ISDEFE.

ANEXOS

ANEXOS

ANEXO A – 1. Encuesta para el análisis de Criticidad.

Equipos	Indicadores de Criticidad con su puntuación						
	Nivel de producción	Frecuencia de falla	Impacto en la producción	TPPR	Costo de Reparación	Impacto seguridad	Impacto ambiental
Bombas de Circulación							
Bombas de Vacío							
Bombas de Enfriamiento							
Bombas de Enfriamiento Estatórico							

ANEXO A – 2. Modelo de la Matriz de Parámetros Óptimos.

MATRIZ DE PARÁMETROS ÓPTIMOS						
Principales Fallas	Variables de Diagnóstico					
	Variable 1	Variable 2	Variable 3	Variable 4	Variable 5	Variable 6
Falla 1						
Falla 2						
Falla 3						

ANEXO A – 3. Tabla para relacionar las consecuencias acumuladas e individuales de la Matriz de Parámetros Óptimos.

Variables de diagnostico	Consecuencias Individuales	Consecuencias Acumuladas	Porcentaje Individual (%)	Porcentaje Acumulado (%)
Variable 1				
Variable 2				
Variable 3				

ANEXO A – 4. Guía para determinar el NPR. Fuente: Kardec y Nascif (2002).

Componentes del NPR	Clasificación	Peso
Frecuencia de la ocurrencia F	Improbable	1
	Muy Pequeña	2 a 3
	Pequeña	4 a 6
	Media	7 a 8
	Alta	9 a 10
Gravedad de la falla G	Apenas imperceptible	1
	Poca importancia	2 a 3
	Moderadamente Grave	4 a 6
	Grave	7 a 8
	Extremadamente grave	9 a 10
Detectabilidad D	Alta	1
	Moderada	2 a 3
	Pequeña	6 a 8
	Muy Pequeña	9
	Improbable	10
Índice de riesgo NPR	Bajo	1 a 50
	Medio	50 a 100
	Alto	100 a 200
	Muy alto	200 a 1000

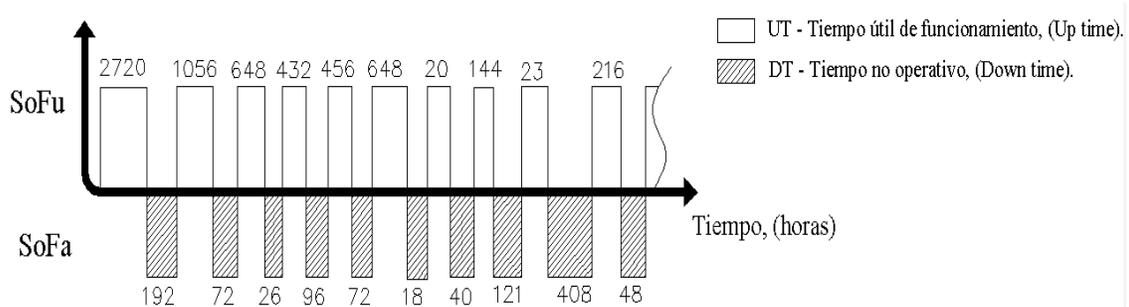
ANEXO A – 5. Plantilla para el FMECA.

Equipo o proceso	Función	Falla funcional	Modo de falla	Índices			NPR	Acciones correctivas
				D	F	G		

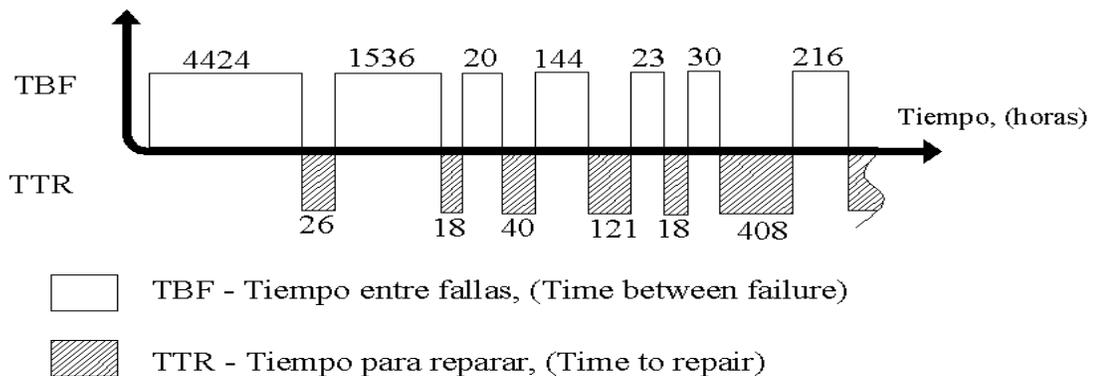
ANEXO A – 6. Guía para seleccionar el tipo de transductor y su posición para bombas verticales y de enfriamiento. Fuente: Norma ISO 13373 – 1.

Machine Type	Evaluation Parameters	Transducer Type	Measurements Locations	Direction	Standard Reference
Vertically mounted pumps	Relative displacement	Non contacting transducer	Motorpump shafts at each accessible bearing, top	Radial 90° apart	ISO 7919 – 5
Coolant pumps	Velocity or acceleration	Velocity transducer or accelerometer	Motor and accessible bearing housing motor shaft	Radial 90° apart	ISO 10816 – 3

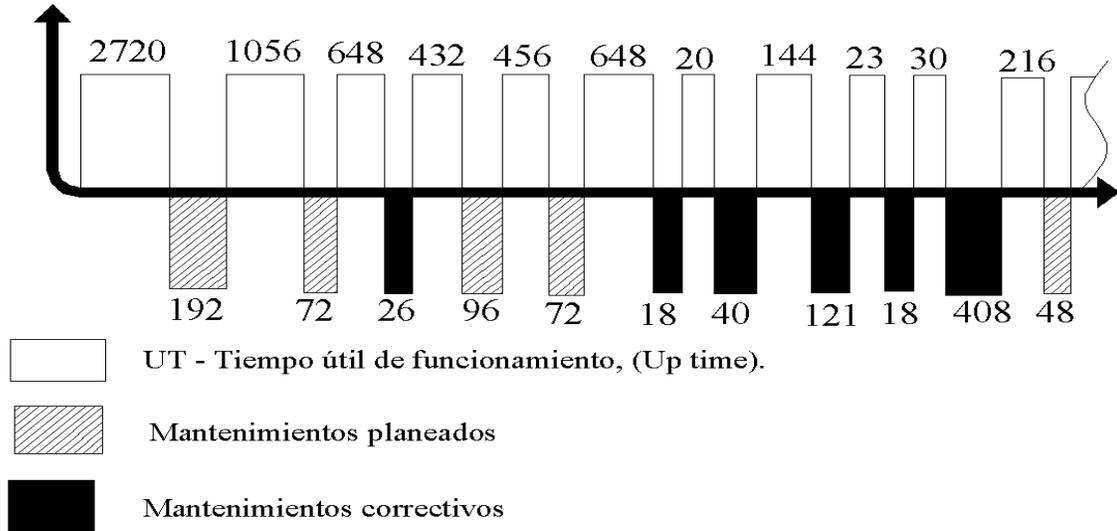
ANEXO A – 7. Perfil de funcionalidad para el cálculo de la Disponibilidad Genérica.



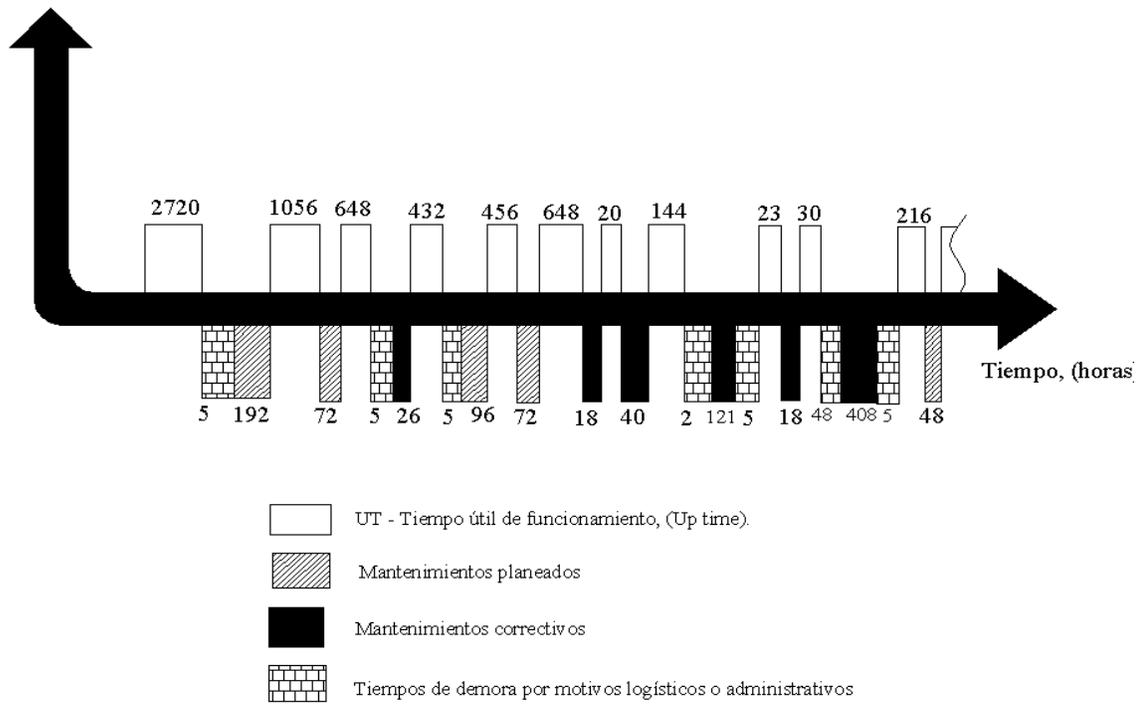
ANEXO A – 8. Perfil de funcionalidad para el cálculo de la Disponibilidad Inherente.



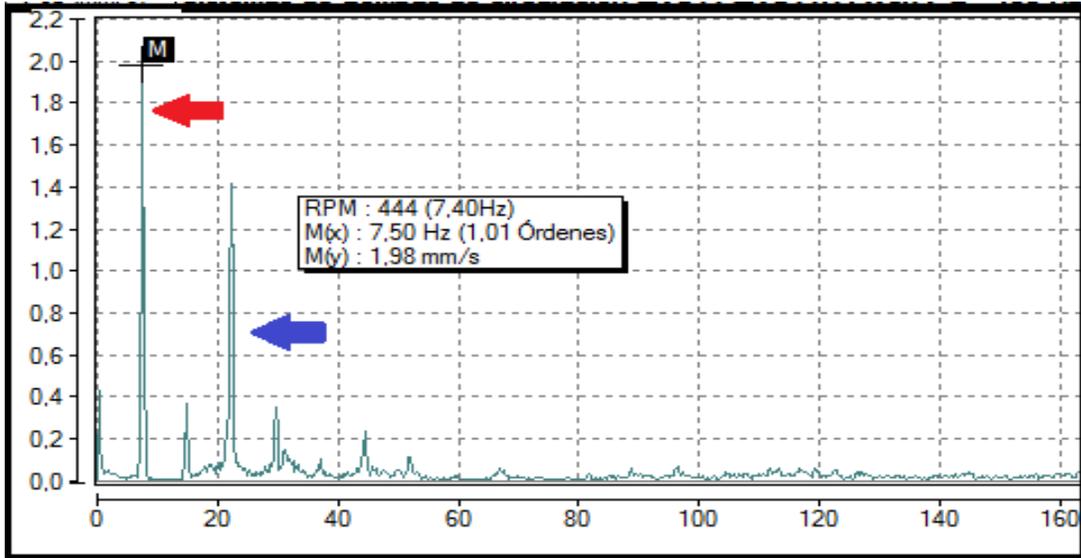
ANEXO A – 9. Perfil de funcionalidad para el cálculo de la Disponibilidad Alcanzada.



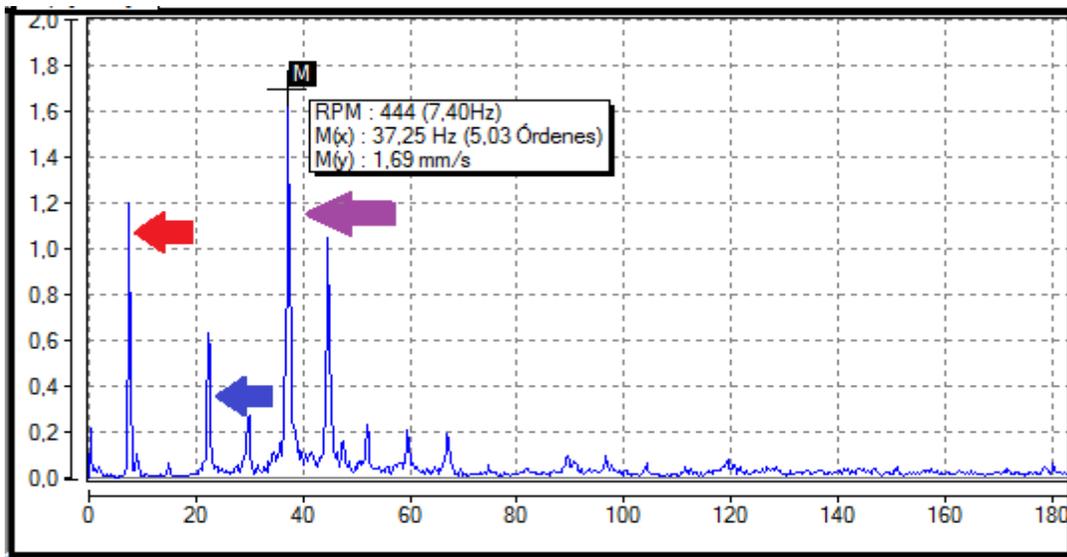
ANEXO A – 10. Perfil de funcionalidad para el cálculo de la Disponibilidad Operacional.



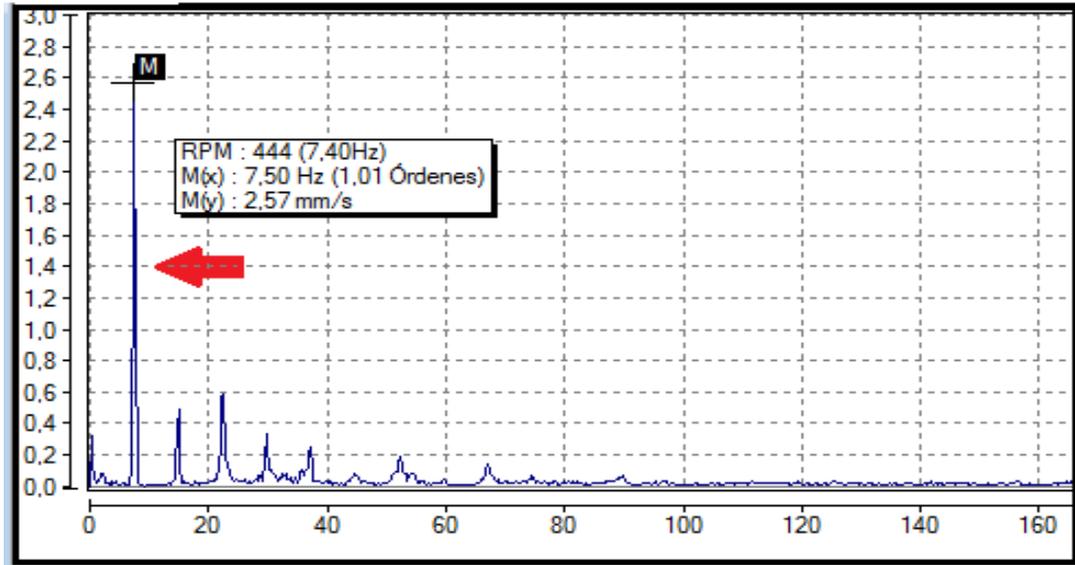
ANEXO A – 12. Patrón de referencia en la dirección axial que indica desalineamiento entre el motor y la bomba y pequeños daños en el cojinete superior.



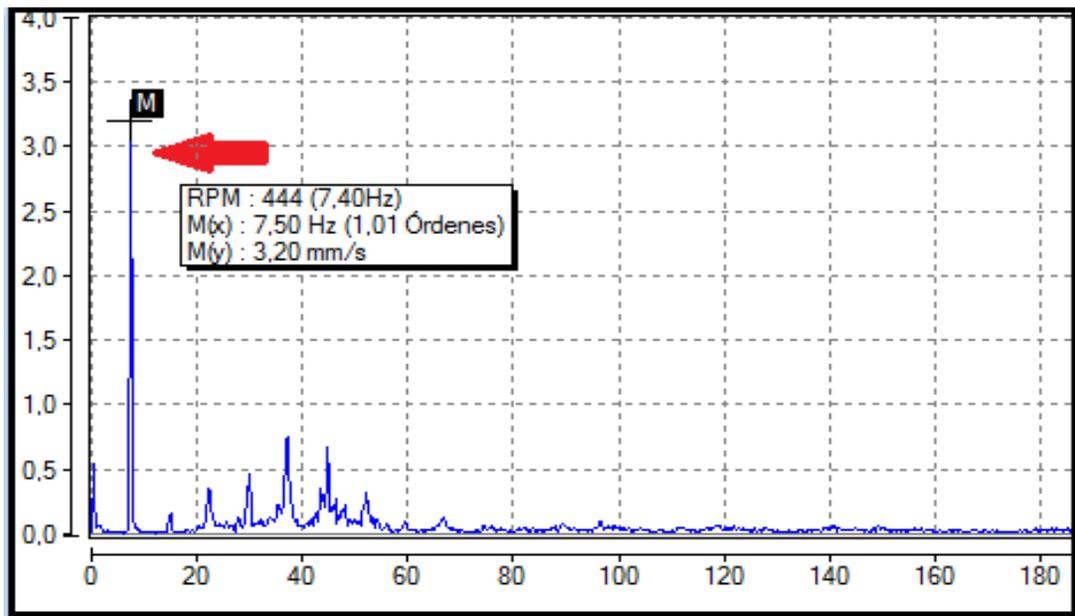
ANEXO A – 13. Patrón de referencia en la dirección radial que indica desalineamiento entre el motor y la bomba y pequeños daños en el cojinete superior.



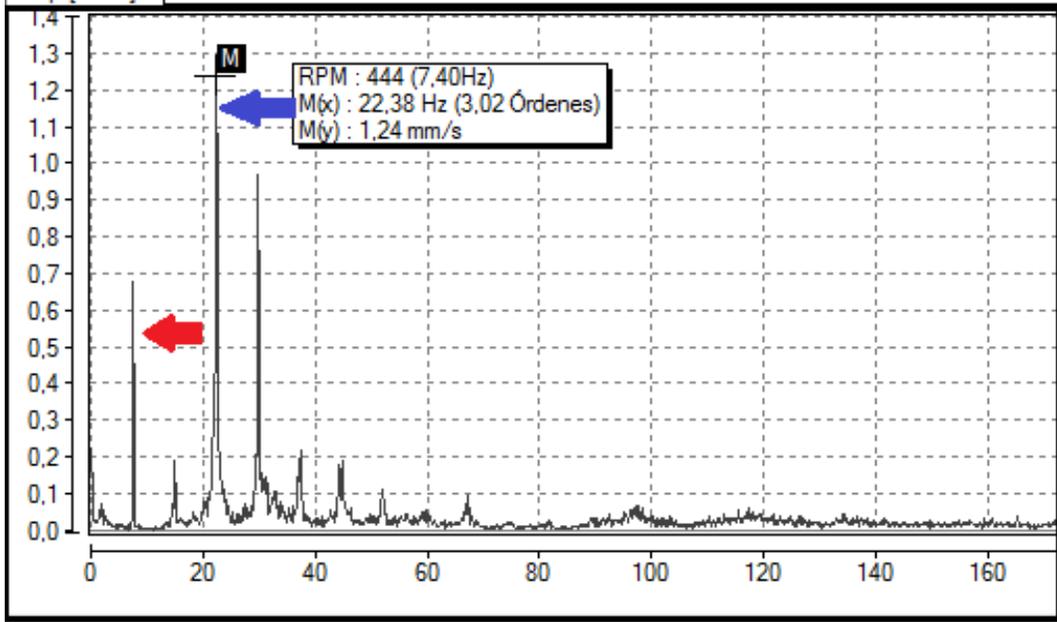
ANEXO A – 14. Patrón de referencia en la dirección axial que indica roce del impelente con la camisa y flojedad estructural del acoplamiento.



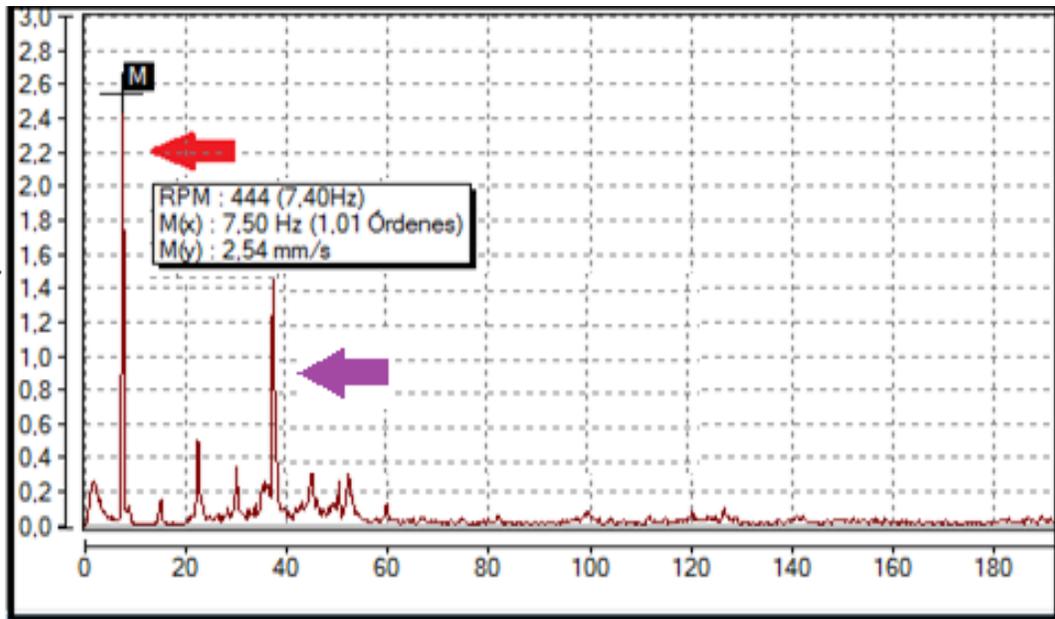
ANEXO A – 15. Patrón de referencia en la dirección radial que indica roce del impelente con la camisa y flojedad estructural del acoplamiento.



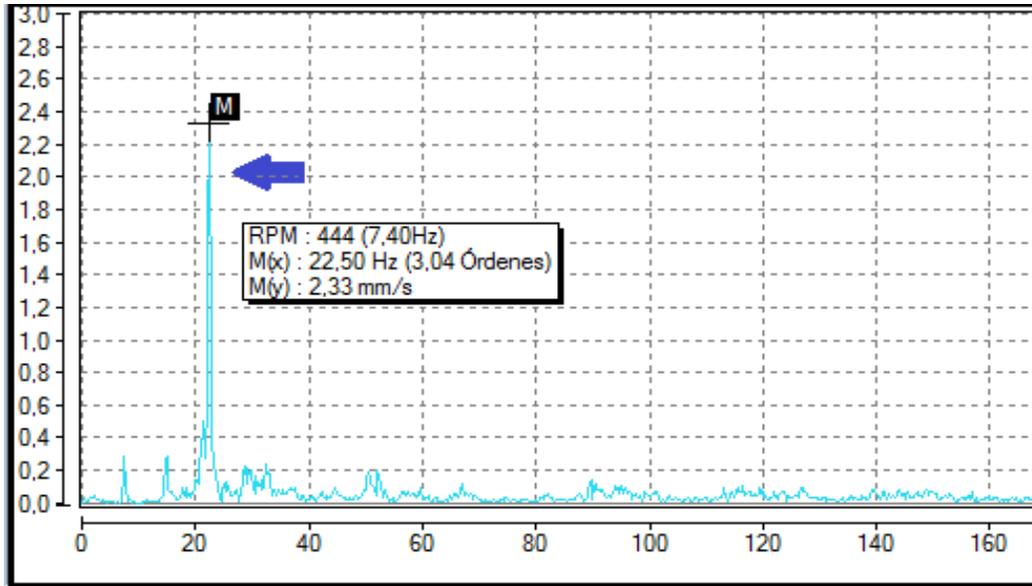
ANEXO A – 16. Patrón de referencia en la dirección axial que indica roce de impelente con cojinete superior dañado.



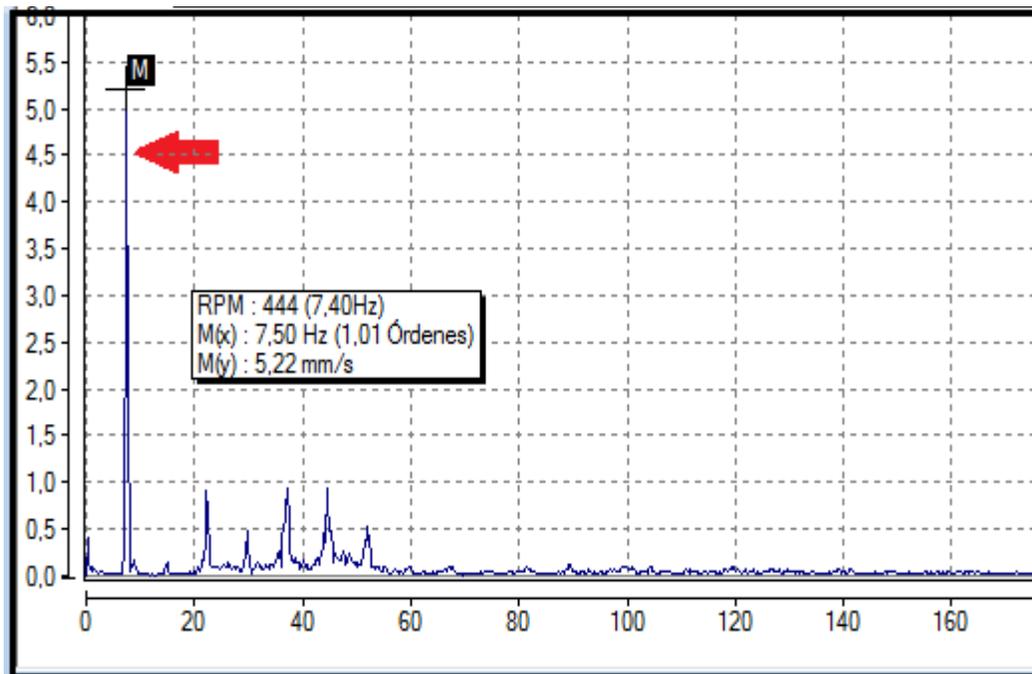
ANEXO A – 17. Patrón de referencia en la dirección radial que indica roce de impelente con cojinete superior dañado.



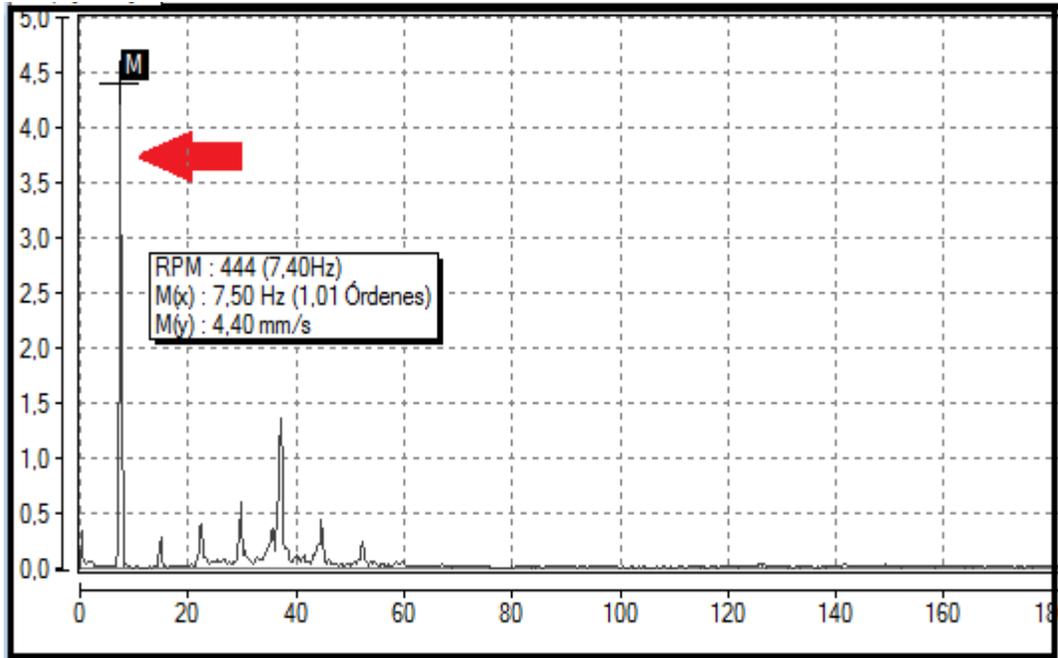
ANEXO A – 18. Patrón de referencia en la dirección axial que indica roce del impelente con la caja y desalineamiento entre el motor y la bomba.



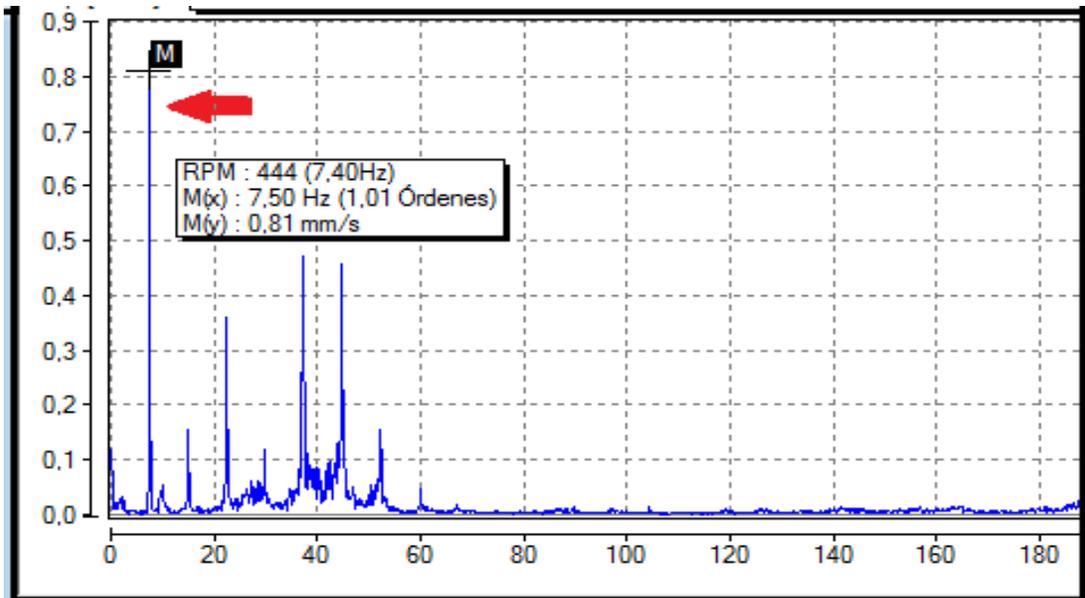
ANEXO A – 19. Patrón de referencia en la dirección radial que indica roce del impelente con la caja y desalineamiento entre el motor y la bomba.



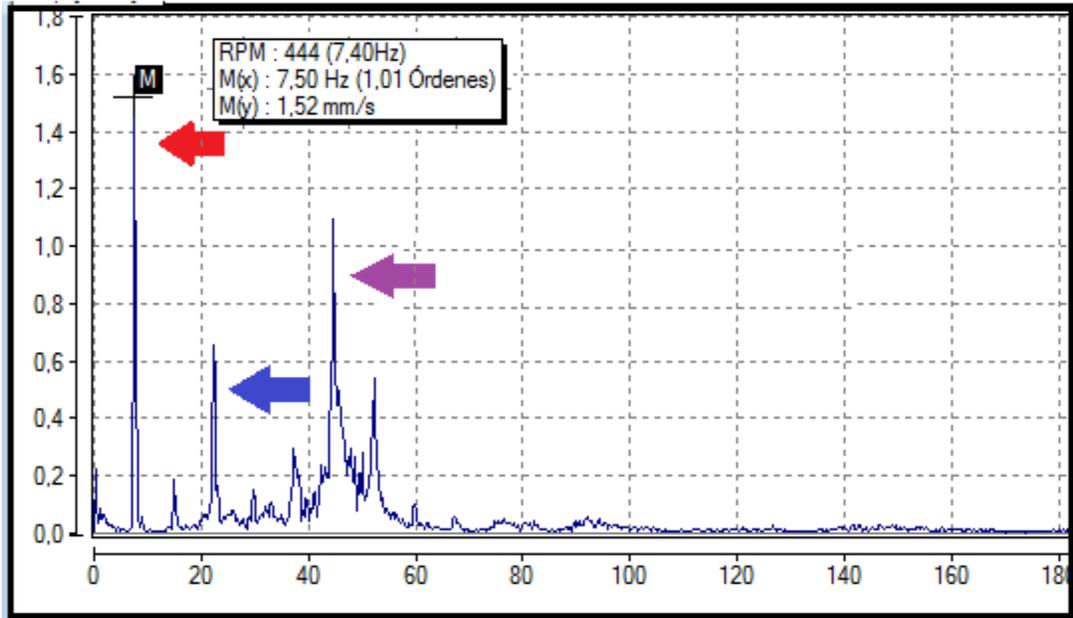
ANEXO A – 20. Patrón de referencia en la dirección axial que indica desalineamiento entre el motor y la bomba.



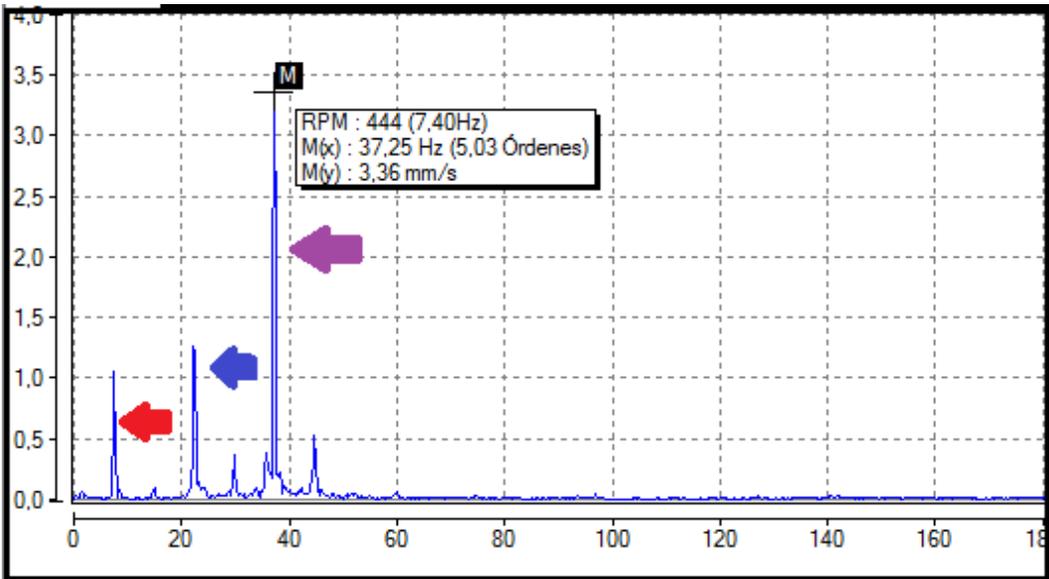
ANEXO A – 21. Patrón de referencia en la dirección radial que indica desalineamiento entre el motor y la bomba.



ANEXO A – 22. Patrón de referencia en la dirección axial que indica roce de impelente con flojedad estructural en la base.



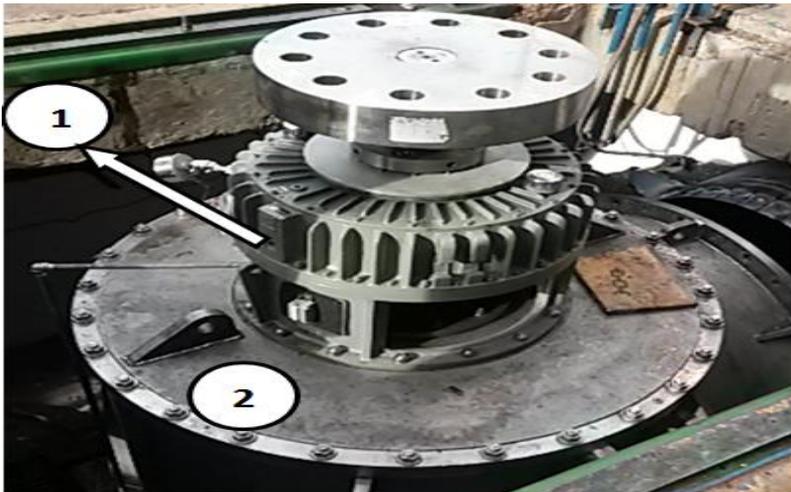
ANEXO A – 23. Patrón de referencia en la dirección radial que indica roce de impelente con flojedad estructural en la base.



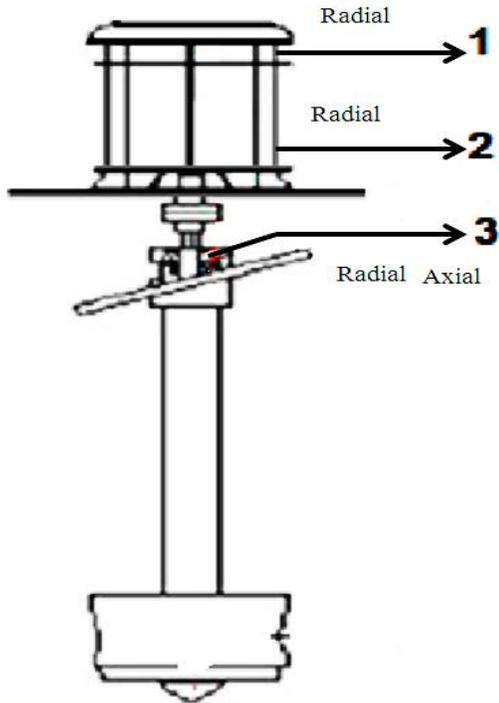
ANEXO A – 24. Tabla de severidad. Fuente: Norma ISO 10816 – 3.

								Velocity 10-1000 Hz $r > 600$ rpm 2-1000 Hz $r > 120$ rpm mm/s rms inch/s rms		
									11	0.43
									7.1	0.28
									4.5	0.18
									3.5	0.14
									2.8	0.11
									2.3	0.09
									1.4	0.06
									0.71	0.03
rigid	flexible	rigid	flexible	rigid	flexible	rigid	flexible		Foundation	
pumps > 15 kW radial, axial, mixed flow				medium sized machines 15 kW < P ≤ 300 kW		large machines 300 kW < P < 50 MW		Machine Type		
integrated driver		external driver		motors 160 mm ≤ H < 315 mm		motors 315 mm ≤ H				
Group 4		Group 3		Group 2		Group 1		Group		
A New machine condition				C Short-term operation allowable						
B Unlimited long-term operation allowable				D Vibration causes damage						

ANEXO A – 25. Puntos de medición para la caracterización de las bombas de circulación.



ANEXO A – 26. Posiciones de los acelerómetros en las bombas de circulación.



ANEXO A – 27. Tiempo de permanencia en la vecindad de las bombas de circulación atendiendo a los niveles globales de vibraciones. Fuente: Reyes (2014).

Tiempo (horas)	Mano-brazo		Cuerpo completo	
	Aceleración umbral	Aceleración límite (mm/s ²)	Aceleración umbral (m/s ²)	Aceleración límite (mm/s ²)
10	2,2	4,5	0,45	0,9
8	2,5	5	0,5	1
6	2,9	5,8	0,58	1,2
4	3,5	7,1	0,71	1,4
2	5	10	1	2
1	7,1	14,1	1,41	2,8