

REPÚBLICA DE CUBA.

MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR.  
UNIVERSIDAD DE CIENFUEGOS.  
FACULTAD DE INGENIERÍA.



## TESIS DE DIPLOMA.

**Título:** Diseño de una Metodología para la aplicación del Mantenimiento Proactivo, utilizando el análisis de las vibraciones en los equipos rotatorios de la Empresa Termoeléctrica de Cienfuegos.

**AUTOR:** Sandor Michel Naranjo Suarez

**TUTORES:** MsC. Silvino Chaviano Bernal.

Ing. Luis Enrique González Quintana.

Ing. Luis Daniel Valle Díaz.

**“AÑO 65 DE LA REVOLUCIÓN”**

**Cienfuegos, 2023**

# ***Pensamiento***

*“La única lucha que se pierde es la que se  
abandona”*

*Ernesto “Che” Guevara*

# *Dedicatoria*

*El presente Trabajo de Diploma, esta dedicado a la persona mas importante y especial que tengo en mi vida, mi hijo Anthony Alejandro Naranjo Bequer, para que lo tome como motivo de orgullo y ejemplo a seguir, para su futura formacion como profesional.*

# *Agradecimientos*

*A mis padres por traerme a la vida, a mi hermana Yulsainy por servirme de ejemplo de familia a seguir y en lo mucho que me ayudado para poder llegar a ser el profesional que soy, a mis abuelos por darme la posibilidad de crecer al lado de personas tan maravillosas que son, y por formar parte de la persona que soy hoy en día, y a quienes les debo la crianza que me dieron, y con ello mi vida. A los profesores de la universidad y compañeros de aula, por sus ayuda y apoyo incondicional.*

*A mis tutores, **Msc. Ing.** Sílvino Chaviano Bernal y al **Ing.** Luis Enrique Gonzales Quintana, por la dedicación, orientación, y confianza que tubieron en mí, para lograr la confección del presente trabajo.*

*A mi hermana Yulsainy.*

*Un agradecimiento muy especial a mi esposa Nury, mi compañera de muchos años, que a pesar de los diversos obstáculos que tuve a lo largo de los estudios, fue mi motor impulsor para poder superarlos y terminar mi formación como profesional.*

*Y a todas aquellas personas, las cuales de una u otra manera hicieron su aporte a mi formación.*

# RESUMEN

El presente trabajo de diploma está dirigido a la realización de una metodología, tomando como base las vibraciones como técnica del mantenimiento proactivo, en una muestra de equipos rotatorios de la CTE “Carlos Manuel de Céspedes”, que permitan determinar previamente, las causas de una posible falla que se pueda producir, y así garantizar una intervención oportuna para garantizar la disponibilidad y eficiencia de los mismos, así como un menor gasto en las acciones de mantenimiento.

Se realizará una valoración técnica y organizativa del mantenimiento de la empresa, así como la revisión de las nuevas técnicas y metodologías mediante el desarrollo del análisis de vibraciones, posibles a aplicar en el diagnóstico. Se desarrolla la aplicación de la metodología de diagnóstico propuesta, posterior a esto se ejecuta la clasificación de los equipos según su importancia productiva. Se determinan cuáles son los equipos a evaluar a partir de la cantidad de averías mediante la aplicación de la Técnica de “Pareto”. Se aplican los métodos y técnicas para la determinación de los parámetros de estado a controlar durante la aplicación del diagnóstico, en la cual se efectúa el análisis Causa – Efecto, la determinación de los instrumentos necesarios y organización del sistema de para el diagnóstico en equipos rotatorios.

**PALABRAS CLAVES:** Mantenimiento proactivo, diagnósticos, vibraciones, equipos rotatorios, parámetros de estado.

# SUMMARY

The present diploma work is aimed at carrying out a methodology based on vibrations, as a proactive maintenance technique, in a sample of roto-dynamic equipment from the CTE “Carlos Manuel de Céspedes”, which allows previously determining, the causes of a possible failure that may occur, and thus guarantee timely intervention to guarantee their availability and efficiency, as well as lower spending on maintenance actions.

A technical and organizational assessment of the company's maintenance will be carried out, as well as the review of new techniques and methodologies through the development of vibration analysis, which can be applied in the diagnosis. The application of the proposed diagnostic methodology is developed, after which the classification of the equipment is carried out according to its productive importance. The equipment to be evaluated is determined based on the number of breakdowns through the application of the “Pareto” Technique. The methods and techniques are applied to determine the state parameters to be controlled during the application of the diagnosis, in which the Cause-Effect analysis is carried out, the determination of the necessary instruments and organization of the monitoring system for the diagnosis in equipment roto-dynamic.

**KEYWORDS:** Maintenance pro-active, diagnostics, vibrations, roto-dynamic equipment, status parameters.

## Contenido

|                                                                                                                                      |           |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>INTRODUCCIÓN .....</b>                                                                                                            | <b>1</b>  |
| <b>CAPÍTULO I. Marco teórico, generalidades.....</b>                                                                                 | <b>5</b>  |
| <b>1.1 Conceptos y terminologías generales referentes a los mantenimientos.</b><br>.....                                             | 6         |
| 1.1.2 Funciones del mantenimiento. ....                                                                                              | 6         |
| <b>1.2 Tipos de mantenimientos.....</b>                                                                                              | <b>8</b>  |
| 1.2.1 Características fundamentales entre los tipos de mantenimiento<br>aplicados. ....                                              | 9         |
| <b>1.3 Evolución del mantenimiento. ....</b>                                                                                         | <b>10</b> |
| <b>1.4 El mantenimiento en la Central Termoeléctrica “Carlos Manuel de<br/>    Céspedes”.....</b>                                    | <b>12</b> |
| 1.4.1 La Falla. ....                                                                                                                 | 14        |
| <b>1.5 Mantenimiento proactivo. ....</b>                                                                                             | <b>15</b> |
| 1.5.1 Objetivo. ....                                                                                                                 | 15        |
| 1.5.2 Como ejecutar el mantenimiento proactivo. ....                                                                                 | 15        |
| 1.5.3 Características del mantenimiento proactivo.....                                                                               | 17        |
| <b>1.6 Sistemas a tener a cuenta en el diagnóstico del mantenimiento proactivo<br/>    de la Termoeléctrica. ....</b>                | <b>17</b> |
| 1.6.1 Diferentes sistemas y sus funciones. ....                                                                                      | 18        |
| <b>1.7 Generalidades sobre las vibraciones.....</b>                                                                                  | <b>19</b> |
| 1.7.1 Que son las vibraciones? .....                                                                                                 | 19        |
| 1.7.2 Terminologías asociadas a las vibraciones. ....                                                                                | 19        |
| <b>1.8 Conclusiones parciales del capítulo I. ....</b>                                                                               | <b>33</b> |
| <b>CAPITULO II. METODOLOGÍA PARA LA APLICACIÓN DEL MANTENIMIENTO<br/>PROACTIVO UTILIZANDO EL MÉTODO DE ANÁLISIS DE VIBRACIONES A</b> |           |

|                                                                                                                                                                                                                                                                    |           |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>EQUIPOS ROTATORIOS DE LA CENTRAL TERMOELÉCTRICA “CARLOS MANUEL DE CÉSPEDES”.....</b>                                                                                                                                                                            | <b>34</b> |
| <b>2.1 – Secuencia metodológica a tener en cuenta para la aplicación del diagnóstico en equipos rotatorios en la Central Termoeléctrica “Carlos Manuel de Céspedes”.....</b>                                                                                       | <b>34</b> |
| <b>2.1.1 Diagnóstico en el sistema organizativo del mantenimiento en la Central Termoeléctrica “Carlos Manuel de Céspedes”. .....</b>                                                                                                                              | <b>35</b> |
| <b>2.1.2. Estructura organizativa y parámetros del diagnóstico.....</b>                                                                                                                                                                                            | <b>36</b> |
| <b>2.1.3 Clasificación de los equipos según su importancia productiva y selección de los tipos de mantenimientos a aplicar para cada caso. ....</b>                                                                                                                | <b>37</b> |
| 2.1.4 Determinación de los equipos a evaluar a partir de la cantidad de averías. ....                                                                                                                                                                              | 40        |
| <b>2.1.5 Aplicación de la técnica de “Pareto”.....</b>                                                                                                                                                                                                             | <b>40</b> |
| 2.1.6 Métodos y Técnicas aplicadas para la determinación de Parámetros de Estado a controlar, durante la aplicación del Diagnóstico en equipos dinámicos. ....                                                                                                     | 42        |
| <b>2.1.7 Determinación los puntos de medición para el diagnóstico de vibraciones en equipos dinámicos.....</b>                                                                                                                                                     | <b>47</b> |
| <b>2.1.8 Periodicidad establecida en los diferentes equipos para sus mediciones e inspección de las vibraciones .....</b>                                                                                                                                          | <b>52</b> |
| 2.1.9 Análisis de los resultados de la medición de las vibraciones en los equipos. Interpretación espectral. ....                                                                                                                                                  | 53        |
| <b>2.2 Conclusiones parciales del capítulo II.....</b>                                                                                                                                                                                                             | <b>55</b> |
| <b>CAPÍTULO III. APLICACIÓN PRÁCTICA DE LA METODOLOGÍA PARA LA APLICACIÓN DEL MANTENIMIENTO PRO-ACTIVO UTILIZANDO EL MÉTODO DE ANÁLISIS DE VIBRACIONES A LOS EQUIPOS ROTATORIOS FUNDAMENTALES DE LA CENTRAL TERMOELÉCTRICA DE “CARLOS MANUEL DE CÉSPEDES”.....</b> | <b>56</b> |

|                                                                                                                                                                                                                                   |           |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>3.1. Paso 1. Diagnóstico del sistema organizativo actual del mantenimiento en la Central Termoeléctrica “Carlos Manuel de Céspedes”.....</b>                                                                                   | <b>56</b> |
| <b>3.1.1. Caracterización del mantenimiento en la Central Termoeléctrica “Carlos Manuel de Céspedes”. .....</b>                                                                                                                   | <b>57</b> |
| <b>3.1.2. Situación técnica - organizativa del mantenimiento en la Central Termoeléctrica “Carlos Manuel de Céspedes”, antes de la aplicación de las nuevas técnicas para el diagnóstico del estado de los dispositivos. ....</b> | <b>57</b> |
| <b>3.2. Paso 2. Clasificación de los equipos o sistemas atendiendo a la importancia de los mismos en el sistema productivo de la central.....</b>                                                                                 | <b>59</b> |
| <b>3.3. Paso 3. Determinación de los equipos a evaluar según la cantidad de fallas presentadas mediante la aplicación de la técnica de Pareto.....</b>                                                                            | <b>61</b> |
| <b>3.4. Paso 4. Métodos y técnicas a aplicar para el análisis de las vibraciones en los equipos rotatorios para el Mantenimiento Proactivo. ....</b>                                                                              | <b>64</b> |
| 3.4.1. Paso 4.1 Resultados de los mantenimientos. Análisis de las bases de datos. ....                                                                                                                                            | 64        |
| 3.4.2. Paso 4.2 Aplicación de la técnica causa - efecto. ....                                                                                                                                                                     | 65        |
| 3.4.3. Paso 4.3 Determinación de los puntos de medición de las vibraciones en los equipos rotatorios, (Azima DLI, 1990 -2010) .....                                                                                               | 67        |
| 3.4.4. Paso 4.4 Determinación de los instrumentos necesarios para el desarrollo del monitoreo de las vibraciones en los equipos rotatorios. ....                                                                                  | 69        |
| 3.4.5. Paso 4.5 Establecer patrones de referencia. ....                                                                                                                                                                           | 71        |
| 3.4.6. Paso 4.6 Establecer la frecuencia de medición para cada equipo rotatorio. ....                                                                                                                                             | 71        |
| 3.4.7. Paso 4.7 Análisis de los resultados de la medición de las vibraciones en los equipos. Interpretación espectral.....                                                                                                        | 73        |
| <b>3.5 Conclusiones parciales del capítulo III. ....</b>                                                                                                                                                                          | <b>80</b> |
| <b>CONCLUSIONES GENERALES .....</b>                                                                                                                                                                                               | <b>81</b> |
| <b>RECOMENDACIONES .....</b>                                                                                                                                                                                                      | <b>83</b> |

|                           |           |
|---------------------------|-----------|
| <b>BIBLIOGRAFÍA .....</b> | <b>84</b> |
| <b>ANEXOS .....</b>       | <b>88</b> |

# INTRODUCCIÓN

La generación eléctrica tiene como objetivo fundamental, garantizar el suministro de energía a todos los consumidores, sin interrupciones y con alta calidad. El proceso tecnológico es muy complejo y requiere en cada una de las etapas y a lo largo de todas las transformaciones energéticas que se producen, un ordenamiento muy definido de la secuencia de las operaciones y un control muy riguroso y periódico de los parámetros fundamentales, precisando en todos los casos, de una organización del mantenimiento tal, que lo hagan competitivo y avanzado en base al estado técnico de los equipos y comprometido no sólo con la reparación sino con la previsión y anticipación de los fallos.

En los últimos años la gestión del mantenimiento ha cambiado aceleradamente, principalmente en aspectos de tipo tecnológico, organizacional, documental y económico. Esto como consecuencia de la importancia que se le atribuye en el ámbito industrial, pasando a formar parte e influyendo de forma directa sobre la gestión y sostenibilidad de cualquier empresa, puesto que actualmente es el encargado de asegurar la condición operativa de una instalación, tomando en cuenta factores importantes como: seguridad del personal y del medio ambiente, gastos generales y utilización de recursos disponibles.

La inserción en Cuba de las industrias termoeléctricas, dentro del desarrollo actual en cuanto a novedosas técnicas y sistemas de mantenimientos, más que un lujo constituye una necesidad por cuanto la economía del país depende en gran medida de la búsqueda de la eficiencia económica, que solo se logra con la calidad del servicio de energía, para esto, la eficiencia con que puede trabajar la industria está estrechamente relacionada con la actividad de mantener la disponibilidad de los equipos, y lograr parámetros óptimos.

El desarrollo industrial de la generación eléctrica, en el territorio de Cienfuegos, cada día se vuelve más competitiva. Para alcanzar este objetivo, se trabaja en el mejoramiento de su disponibilidad y de su confiabilidad como única forma de reducir

los costos y aumentar su eficiencia, como una de las tareas prioritarias de toda gran industria moderna.

La Empresa Termoeléctrica Cienfuegos (CTE), en su gestión de mantenimiento, combina las diferentes técnicas, de acuerdo a las condiciones y características que se manifiesten, donde se desarrollan acciones de mantenimiento reactivo (contra avería), mantenimiento preventivo planificado (MPP) y el mantenimiento predictivo basado en la condición (MBC),. Este último, potenciado con altas tecnologías y un grupo de especialistas con una elevada categoría profesional, se ha convertido en un factor de alto nivel y confiabilidad, en la reducción de averías, lo cual influye de manera positiva en los aspectos de calidad, disponibilidad de los equipos y reducción de los costos por concepto de mantenimiento. Dentro de las técnicas que se desarrollan, el análisis de vibraciones es un pilar fundamental, por la cantidad de información que se obtiene a partir del diagnóstico realizado a los parámetros de estado de los equipos roto-dinámicos.

El presente trabajo titulado “Diseño de una Metodología para la aplicación del Mantenimiento Pro – Activo”, mediante el análisis de vibraciones en los equipos roro-dinámicos, en la Empresa Termoeléctrica Cienfuegos”, la cual está en correspondencia con la idea anterior y a través de las técnicas de mediciones, datos históricos recopilados y criterios de expertos se realizan aportes claves que favorecen la gestión del mantenimiento. No obstante, en análisis realizados por el Departamento de Diagnóstico, perteneciente a la Dirección Técnica de la Entidad, se ha planteado la siguiente observación:

A pesar de desarrollarse por parte de los expertos de diagnóstico, un trabajo estable y continuo en cuanto a las mediciones de los parámetros de estado, a partir de las vibraciones en equipos dinámicos de la CTE, y que estos resultados muestren, que vienen evidenciándose síntomas o anormalidades en el funcionamiento de los mismos, no se utiliza ninguna aplicación técnica o método que permita definir qué defecto o irregularidad específica se viene manifestando, cual ello garantizaría una definición oportuna de la posible falla y a su vez una intervención acertada de las

acciones de reparación o mantenimiento. En virtud de esta problemática, se plantea el siguiente **Problema investigativo:**

La Empresa Termoeléctrica de Cienfuegos no cuenta con una metodología que permita aplicar el mantenimiento Pro – Activo utilizando el método del análisis de las vibraciones a los equipos rotatorios.

Por lo que la identificación de este problema ha permitido formular la siguiente **Hipótesis:**

Es posible diseñar la metodología para la aplicación del Mantenimiento Pro - Activo utilizando el método del análisis de las vibraciones a los equipos rotatorios de la Empresa Termoeléctrica de Cienfuegos.

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

Diseñar una Metodología para la aplicación del Mantenimiento Pro – Activo utilizando el análisis de las vibraciones en los equipos rotatorios de la Empresa Termoeléctrica de Cienfuegos.

El presente trabajo también cuenta con los siguientes **Objetivos Específicos:**

1. Realizar una búsqueda bibliográfica acerca del mantenimiento en las industrias.
2. Realizar una valoración técnica de la organización del mantenimiento en la Central Termoeléctrica de Cienfuegos
3. Llevar a cabo una investigación detallada, mediante normas, artículos, revistas, sitios web, y datos estadísticos de la Termoeléctrica, etc. sobre el mantenimiento proactivo, con el objetivo de ganar en conocimiento y nos pueda ayudar a implementar la metodología a proponer.
4. Diseñar y proponer una metodología para la aplicación del Mantenimiento Pro – Activo utilizando el análisis de las vibraciones en los equipos rotatorios de la Empresa Termoeléctrica de Cienfuegos.

5. Aplicar la metodología propuesta del mantenimiento Pro – Activo utilizando el método del análisis de las vibraciones en los equipos rotatorios.

## CAPÍTULO I. Marco teórico, generalidades.

Para evaluar la gestión del mantenimiento, se han de definir claramente los objetivos que el mantenimiento pretende conseguir. Estos objetivos se fijarán en función de los objetivos trazados por las empresas en cuanto a ser más eficientes.

Hoy en día, las estrategias del mantenimiento están encaminadas a garantizar la disponibilidad y eficacia requerida de las industrias, equipos e instalaciones, asegurando la duración de su vida útil y minimizando los costos de mantenimiento, y las consecuencias negativas de las fallas, dentro del marco de la seguridad y el medio ambiente.

Los factores críticos de éxito de la gestión del mantenimiento son la **disponibilidad**, que va a indicarnos la fracción de tiempo en que las unidades o equipos están en condiciones de servicio y la **eficiencia**, que indica, la fracción de tiempo en que su servicio resulta efectivo para la producción.

La disponibilidad se ha de tener sólo cuando se requiera, lo cual no quiere decir que deba ser por igual en todos los sistemas o equipos, pues depende mucho de la criticidad de los mismos, y esa criticidad puede variar según las condiciones del mercado. Tener una disponibilidad demasiado elevada en sistemas o equipos que no se necesitan, sólo ocasiona un exceso de costos, al hacer un uso excesivo de los recursos de mantenimiento.

Atendiendo a una adecuada comprensión del presente trabajo, se relacionan a continuación los términos más frecuentes utilizados en la actividad del mantenimiento, el diagnóstico y técnicas que se aplican, detallando las relacionadas con el objeto de estudio.

Teniendo como premisa su importancia, revisemos algunas definiciones básicas de mantenimiento y sus clasificaciones.

## **1.1 Conceptos y terminologías generales referentes a los mantenimientos.**

**Mantenimiento**, es el conjunto de técnicos o tecnologías que aseguran la correcta utilización de edificios e instalaciones y el continuo funcionamiento de la maquinaria para conseguir a un costo competitivo la disponibilidad de los activos. Por lo que se puede decir que son todas las acciones necesarias para que un ítem sea conservado o restaurado de modo tal que permanezca de acuerdo con una condición específica. (Morrow, 1973).

### **1.1.2 Funciones del mantenimiento.**

Portuondo Pichardo (1990) plantea que las funciones del mantenimiento caracterizan y se encargan de justificar la existencia de una subdivisión de la empresa dedicada al mantenimiento. Acerca de esto describió las funciones básicas de mantenimiento las cuales se dividen en primarias y secundarias. Las funciones primarias están referidas al mantenimiento, inspecciones, servicio de lubricación y protección contra la corrosión, recuperación y modificación de equipos, instalaciones y edificaciones. Las funciones secundarias incluyen la protección técnica y los medios técnicos para la limpieza tecnológica de equipos e instalaciones, los medios técnicos para la eliminación de desechos y la generación y distribución de algunas producciones auxiliares como energía eléctrica, vapor, aire comprimido, aire para instrumentos y agua de enfriamiento. (Portuondo Pichardo, 1990), (García Garrido, 2012)

#### **1.1.2.1 Funciones primarias:**

- Mantener, reparar y revisar los equipos e instalaciones.
- Generación y distribución de los servicios eléctricos, vapor, aire, agua, gas, etc. Modificar, instalar, remover equipos e instalaciones.
- Nuevas instalaciones de equipos y edificios.
- Desarrollo de programas de Mantenimiento Preventivo y Programado
- Selección y entrenamiento de personal.

#### **1.1.2.2 Funciones secundarias:**

- Asesorar la compra de nuevos equipos.
- Hacer pedidos de repuestos, herramientas y suministros.
- Controlar y asegurar un inventario de repuestos y suministros.
- Mantener los equipos de seguridad y demás sistemas de protección.
- Llevar la contabilidad e inventario de los equipos.
- Cualquier otro servicio delegado por la administración.

## 1.2 Tipos de mantenimientos

**Mantenimiento Planificado:** Es aquel que implica una pro actividad, es decir, plantea una programación de tareas con el fin de mitigar el riesgo de que se produzca una avería o de que ésta llegue a generar consecuencias no deseadas. Estas tareas se pueden programar a intervalos fijos (preventivo), según condición (predictivo) o cuando ya se ha producido la avería, pero no se requiere una acción inmediata (reactivo), (Ballestero Roble, 2017)

**Mantenimiento no Planificado:** Es el mantenimiento reactivo inmediato. La avería ya se ha producido y se ha de reparar inmediatamente.

Teniendo en cuenta otros aspectos se establecen otras clasificaciones. (Morrow, 1973)

**Mantenimiento reactivo y/o correctivo contra averías (MRCA),** son todos los servicios ejecutados a los equipos con fallos o defectos. Se puede definir como la actividad humana desarrollada sobre los recursos cuando como consecuencias de alguna falla han dejado de prestar los servicios esperados.

**Mantenimiento Preventivo Planificado (MPP),** son todos los servicios de inspección sistemática, ajustes, conservación y eliminación de defectos que contribuyan a evitar averías. El MPP puede ser según recomendaciones del fabricante, medición de parámetros de síntomas y basado en la fiabilidad.

**Mantenimiento Predictivo,** son todos los servicios de inspección sistemática que se realizan, procurando prever, o predecir qué es lo que puede ocurrir a un recurso, con vistas a actuar preventivamente y evitar las acciones correctivas. El mantenimiento predictivo puede ser: predictivo puro, por condición y preventivo – predictivo. (Ballestero Roble, La Estrategia predictiva del mantenimiento industrial, 2017).

**El Mantenimiento Productivo Total (TPM)** es un sistema de mejora continua basado en un concepto de origen japonés, que se centra en el mantenimiento y

funcionamiento de los equipos. El TPM se basa en la idea de que todos los empleados deben participar en el mantenimiento de su propio entorno de trabajo. (Suniaga, 2023)

### 1.2.1 Características fundamentales entre los tipos de mantenimiento aplicados.

En la tabla que se expone a continuación (Tabla 1.3.1), se realiza una comparación de las características de los tipos de mantenimiento fundamentales, donde se evidencia la variabilidad entre los mismos.

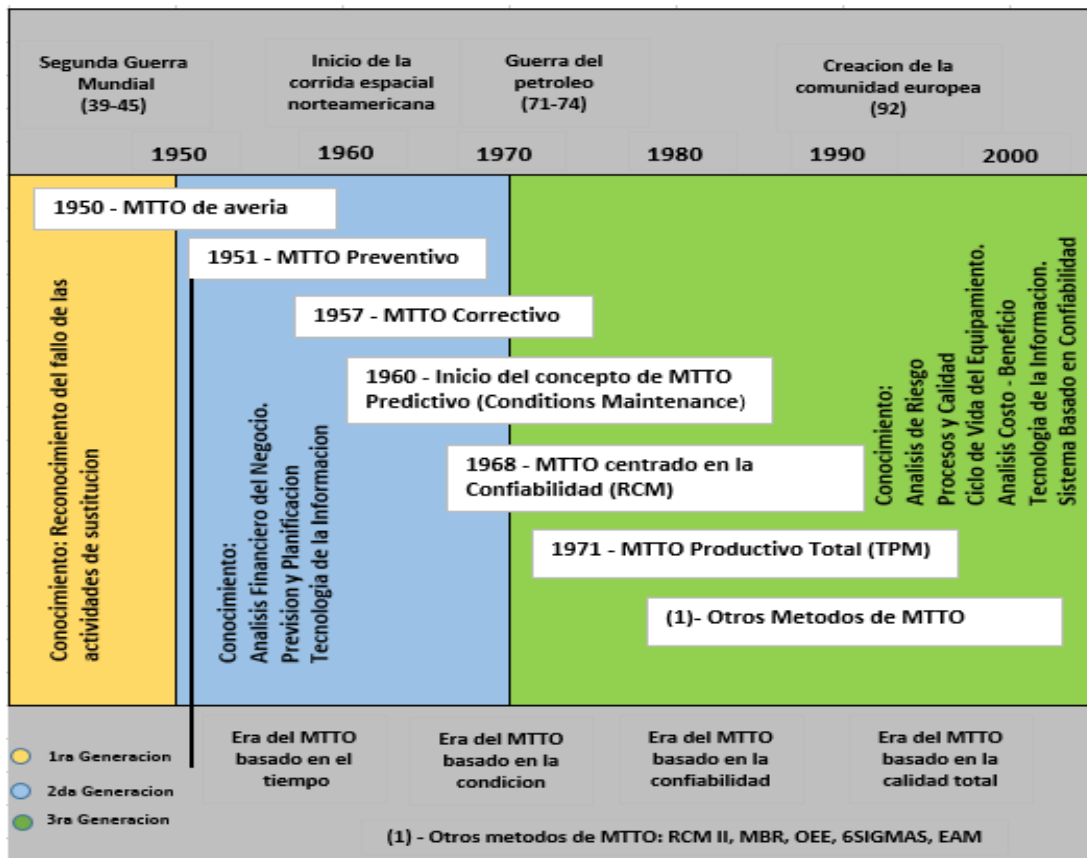
**Tabla 1.1** Tabla comparativa de las características de los tipos de mantenimientos fundamentales. Fuente (Elaboración propia).

| Mantenimiento Correctivo.                                                                       | Mantenimiento Preventivo.                                                           | Mantenimiento Predictivo.                                                         |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| 1.-Las averías son de forma imprevista creando trastornos a la producción.                      | 1.- Reduce las probabilidades de avería imprevistas.                                | 1.-Detecta precozmente los defectos, sin necesidad de parar las máquinas.         |
| 2.-Las reparaciones pueden ser costosas.                                                        | 2.- Reduce el costo la reparación imprevista.                                       | 2.-Permite programar solo las intervenciones necesarias.                          |
| 3.- No es posible contar siempre con los recursos y personal de reparación por ser imprevistas. | 3.- Aumentan los gastos en mano de obra y materiales, aunque se compensan al final. | 3.-Programa el stock de materiales y mano de obra a necesitar.                    |
| 4.- Pueden repercutir en la seguridad del personal o las instalaciones.                         | 4.- Genera la programación de paradas innecesarias en las máquinas.                 | 3.- Control sobre los defectos con la máquina funcionando.                        |
| 5.- Se explota al máximo los agregados.                                                         | 5.- Se planifican los gastos y las pérdidas de producción.                          | 4.- Permite técnicas de computación para el análisis y seguimiento de las fallas. |

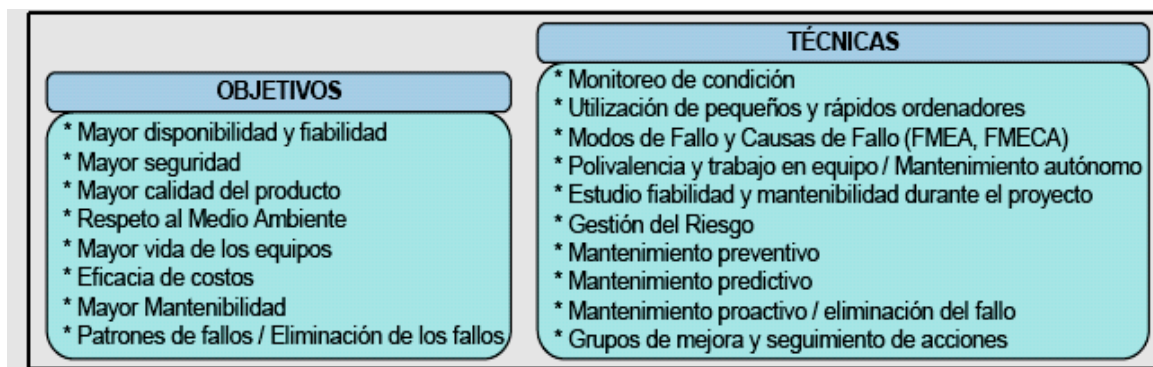
### **1.3 Evolución del mantenimiento.**

Durante los últimos veinte años, el mantenimiento ha cambiado, quizás más que cualquier otra disciplina gerencial. Estos cambios se deben principalmente al enorme aumento en número y en variedad de los activos físicos que deben ser mantenidos en todo el mundo, diseños más complejos, nuevos métodos de mantenimiento, disponibilidad de equipos de diagnóstico y técnicas de medición y una óptica cambiante en la organización de esta actividad y sus responsabilidades (Moubay, 1997), (Jeira & Gibson, 2004). El mantenimiento también está respondiendo a expectativas cambiantes. Estas incluyen una creciente toma de conciencia para evaluar: hasta qué punto las fallas en los equipos afectan la seguridad y el medio ambiente, la relación entre el mantenimiento y la calidad del producto, y la presión de alcanzar una alta disponibilidad en la planta y mantener acotado el costo.

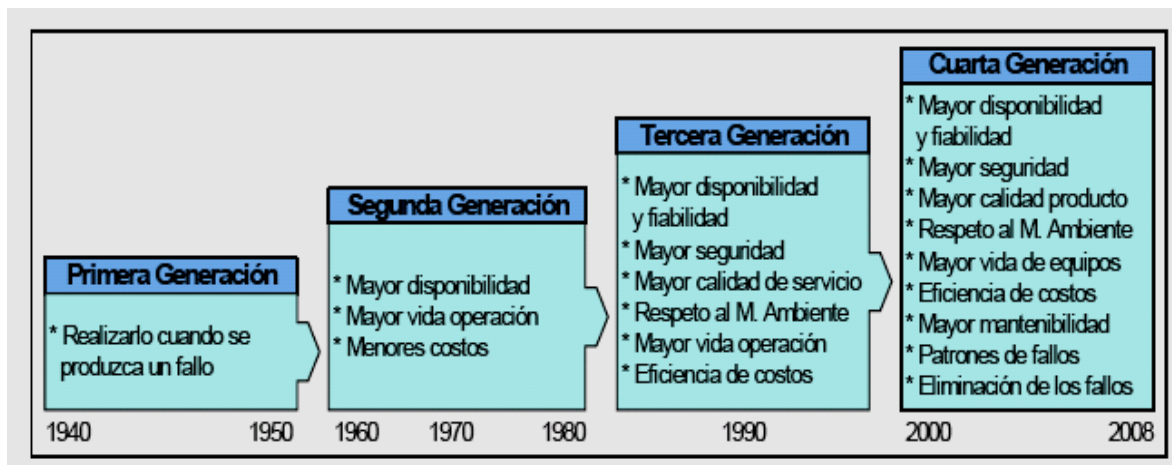
Varios autores (Alkaim, 2003), (Jaramillo, 2004), (Arias, 2006), consideran que estos cambios acontecidos a través de tres generaciones, representan cómo han venido creciendo las expectativas respecto al desempeño del mantenimiento, la visión de la naturaleza de los fallos del equipamiento y las mejores prácticas utilizadas en una época determinada (ver Figura 1.1). Sin embargo, (Garcia & Quijano, 2004), y (Gonzales, 2007), plantean que a los desarrollos en la tercera generación del mantenimiento se han ido añadiendo nuevas tendencias, técnicas y filosofías (ver Figura 1.2), de tal forma que actualmente se puede hablar de una cuarta generación del mantenimiento. A modo de resumen, en la Figura 1.3 y Figura 1.4, se presenta como han ido evolucionando las expectativas y técnicas del mantenimiento durante estas cuatro generaciones.



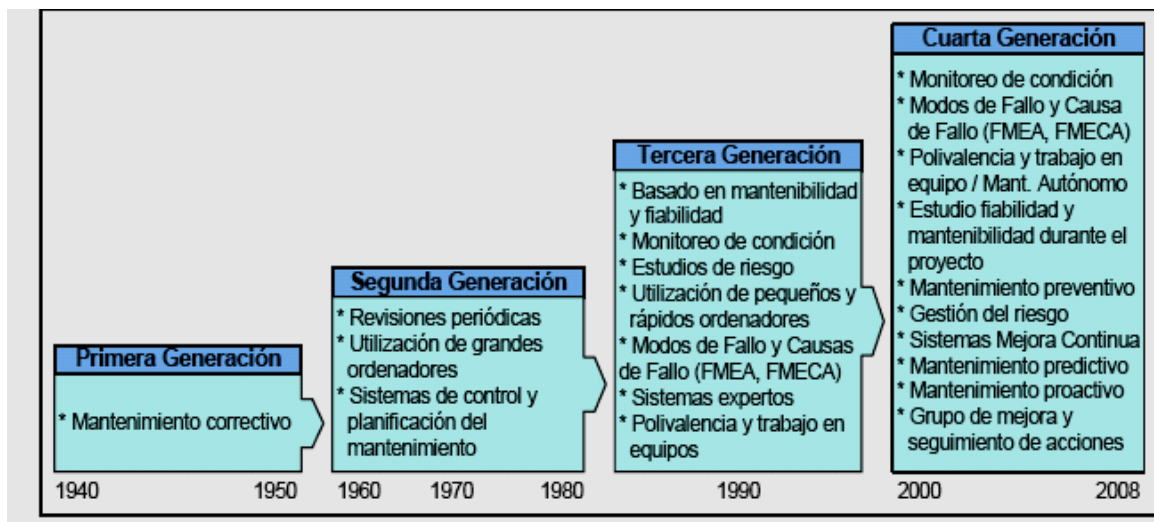
**Figura 1.1** – Síntesis evolutiva del mantenimiento. Fuente (Alkaim, 2003)



**Figura 1.2** Cuarta generación del mantenimiento. Fuente: (García & Quijano, 2004)



**Figura 1.3** Evolución de las expectativas del mantenimiento. Fuente: (Garcia & Quijano, 2004)



**Figura 1.4** Evolución de las técnicas del mantenimiento. Fuente: (Garcia & Quijano, 2004).

#### 1.4 El mantenimiento en la Central Termoeléctrica “Carlos Manuel de Céspedes”.

El mantenimiento en la Termoeléctrica se enfoca como misión en garantizar la creación de condiciones óptimas en el estado técnico de los equipos, partes, piezas e instalaciones productivas en general, que permitan alcanzar altos niveles de disponibilidad técnica todo el año, con eficiencia y eficacia al menor costo posible, apoyados en el uso de las técnicas de diagnóstico y la automatización de la

información, aplicar la ciencia y la técnica, crear condiciones para asimilar y desarrollar nuevas tecnologías así como la reducción de los costos impactantes en correlación al tema.

Las funciones principales y generales del mantenimiento se dirigen a:

- ✓ Organizar el proceso de prestación de servicio de mantenimiento y producción de piezas y componentes, utilizando las técnicas más modernas de diagnóstico para garantizar los altos niveles de disponibilidad técnica del equipamiento y la maquinaria.
- ✓ Organizar y entrenar la fuerza de trabajo en brigadas con un amplio perfil profesional.
- ✓ Proyectar y ejecutar sus planes y presupuestos, así como los objetivos y metas a alcanzar en cada período.
- ✓ Aplicar rigurosamente el sistema de mantenimiento establecido, apoyado en sistema de gestión automatizados para la toma de decisiones.
- ✓ Aplicar la política de innovación tecnológica de toda la maquinaria en general y asimilación de nuevos equipos y tecnologías para mejorar la eficiencia económica de la empresa, incrementar su competitividad y convertirla en un factor decisivo para el cambio tecnológico.
- ✓ Dirigir el proceso inversionista y contratar la ejecución de las obras.

Durante los últimos treinta años, se ha tenido en cuenta en la Empresa y UNE, que el mantenimiento ha cambiado, quizás más que cualquier otra disciplina gerencial. Estos cambios se deben principalmente al enorme aumento en número y en variedad de los activos físicos que deben ser mantenidos en todo nuestros sistemas de generación de energía, diseños más complejos, nuevos métodos de mantenimiento, y una óptica cambiante en la organización de esta actividad y sus responsabilidades. El mantenimiento también está respondiendo a expectativas cambiantes. Estas incluyen una creciente toma de conciencia para evaluar: hasta qué punto las fallas en los equipos afectan la seguridad y el medio ambiente, la relación entre el mantenimiento y la calidad del producto, y la presión de alcanzar una alta disponibilidad en la planta, y mantener acotado el costo. Producto de todas

estas exigencias surge la cuarta generación del mantenimiento, y con este la aplicación de nuevas técnicas que permitan actuar de manera **proactiva**, sobre la detección de fallas e identificación de las posibles causas, cuestiones a valorar en el presente trabajo.

#### **1.4.1 La Falla.**

Se dice que un componente o equipo ha fallado cuando llega a ser completamente inoperante o puede todavía operar, sin cumplir satisfactoriamente la función para la que fue diseñado o por serios daños haciendo inseguro su uso, es decir, no puede o ha perdido la capacidad para cumplir su objetivo a satisfacción, ya sea en cantidad, calidad u oportunidad.

También: Incapacidad de un sistema o de uno de sus componentes para satisfacer un estándar de funcionamiento deseado. Una condición de falla es simplemente un estado de operación insatisfactorio.

##### **1.4.1.1Tipos de Falla.**

✓ **Falla Evidente:** Situación en la que la persona encargada de operar un equipo puede detectar una condición anormal utilizando únicamente sus sentidos, por ejemplo cuando observa un incremento en la presión diferencial de un filtro, puede advertir que este se está taponando, o cuando observa que una bomba no descarga la presión requerida por posible excesivo desgaste del impulsor, o cuando nota una alta temperatura de un rodamiento como consecuencia de deficiencias en la lubricación.

✓ **Falla Oculta:** No se puede detectar durante la operación normal del equipo, estas fallas ocurren cuando se activa un evento secundario, por ejemplo una válvula de seguridad se mantiene en stand-by hasta que cierta presión es alcanzada por el recipiente que esta protege, en ese momento es cuando sabemos si trabaja correctamente o no.

✓ **Falla Incipiente:** En la mayoría de los casos las fallas son producto de un proceso de deterioro progresivo y cuantificable, permitiéndose la predicción del

tiempo para la falla. Incipiente es el momento en el que la falla se hace detectable. Vigilando los parámetros apropiados y definiendo valores permisibles resulta una tarea relativamente sencilla. La falla incipiente desde el punto de vista de la Confiabilidad es una falla funcional, es decir una de las funciones del sistema ha caído a límites inaceptables y deben planificarse las acciones proactivas, preventivas y/o correctivas oportunas, para evitar la falla de la función principal del sistema.

### **1.5 Mantenimiento proactivo.**

Es la última innovación en el campo del mantenimiento predictivo, el cual usa una gran cantidad de técnicas para alargar la duración de operación. La parte mayor de un programa proactivo es el análisis de las causas fundamentales de las fallas en máquinas, se define como el conjunto de actividades planificadas y sistemáticas que se realizan de manera regular para evitar fallos y maximizar la vida útil de los equipos. En lugar de esperar a que los equipos fallen, el enfoque proactivo se basa en la detección y eliminación temprana de las posibles causas que pueden conllevar a las fallas, la implementación de medidas preventivas y la optimización constante de los procesos de mantenimiento. (Suniaga, 2023)++++

#### **1.5.1 Objetivo.**

El objetivo principal del mantenimiento proactivo es reducir los costos asociados con las averías y reparaciones no planificadas, minimizar los tiempos de inactividad y maximizar la eficiencia operativa. Al anticiparse a los problemas potenciales, las organizaciones pueden evitar interrupciones en la producción, mejorar la calidad de los productos o servicios y optimizar el rendimiento general de los equipos.

#### **1.5.2 Como ejecutar el mantenimiento proactivo.**

El mantenimiento proactivo implica varias etapas clave. En primer lugar, se lleva a cabo una evaluación exhaustiva de los equipos para identificar posibles puntos débiles y áreas de mejora. Esto implica revisar el historial de mantenimiento,

recopilar datos sobre el rendimiento pasado de los equipos y realizar análisis de causa raíz para identificar las principales causas de fallo.

A continuación, se establecen planes de mantenimiento preventivo, que incluyen: inspecciones periódicas, lubricación, ajustes, calibraciones y sustitución de componentes desgastados. Estos planes se basan en las recomendaciones del fabricante, las mejores prácticas de la industria y la experiencia acumulada en la gestión de los equipos.

Además, se implementan sistemas de monitoreo continuo, como el uso de sensores y tecnología, para recopilar datos en tiempo real y anticiparse a los posibles problemas. Estos sistemas permiten supervisar el estado de los activos de forma remota y generar alertas tempranas cuando se detectan desviaciones en los parámetros establecidos. Mediante el uso de técnicas de análisis avanzadas, como el análisis de tendencias, el análisis de vibraciones o el aprendizaje automático, es posible identificar patrones y señales que indiquen un posible fallo inminente.

### 1.5.3 Características del mantenimiento proactivo.

Este mantenimiento se caracteriza por los siguientes aspectos:

- **Enfoque preventivo:** El mantenimiento proactivo se centra en prevenir fallos y problemas eliminando las causas, antes de que estos ocurran.
- **Planificación sistemática:** Se establecen programas de mantenimiento periódico y se sigue un enfoque sistemático en la ejecución de las tareas.
- **Monitoreo continuo:** Se utilizan herramientas y tecnologías para recopilar datos y monitorear el estado de los equipos de manera constante.
- **Optimización continua:** El mantenimiento proactivo no se detiene con la implementación de medidas preventivas iniciales. Se busca mejorar constantemente los procesos de mantenimiento y aumentar la eficiencia operativa. Esto implica revisar y actualizar los planes de mantenimiento, aprovechar las nuevas tecnologías y técnicas de análisis de datos, y aprender de las experiencias pasadas para su optimizar

Como hemos podido observar en cuanto a la información anteriormente expuesta referente al mantenimiento proactivo, la cual nos da a conocer sus diferentes características benéficas que posee, y debido a esto es muy aplicado hoy en día a diversas ramas, porque es un mantenimiento que beneficia mucho a las organizaciones en aspectos importantes como, el ámbito económico, estabilidad en la producción, prolongación de la vida útil en los equipos, salud y seguridad de los operarios, entre otros aspectos.

### 1.6 Sistemas a tener a cuenta en el diagnóstico del mantenimiento proactivo de la Termoeléctrica.

La central termoeléctrica “Carlos Manuel de Céspedes”, está compuesta por una estructura interna de sistemas, implicados directamente a la producción de energía, los cuales son los encargados de garantizar la producción constante de electricidad, dichos sistemas serán mencionados a continuación, así como de manera sintetizada, sus respectivas funciones.

### 1.6.1 Diferentes sistemas y sus funciones.

- **Sistema de alimentar.** Es el sistema encargado del suministro constante de agua de alimentar hacia el generador de vapor (caldera), mediante sus bombas (BAA).
- **Sistema de combustible.** Tiene como función a través de sus bombas, suministrar el combustible para el proceso de combustión en el horno de la caldera.
- **Sistema de turbina.** Sistema diseñado para recibir la energía térmica, proveniente del generador de vapor (caldera), y transformarla en energía eléctrica.
- **Sistema de lubricación.** Es el sistema encargado de garantizar la lubricación constante al sistema de turbina.
- **Sistema de circulación.** Tiene como función mediante el uso de sus bombas (BAC), hacer circular el agua proveniente del mar, a través de los diferentes sistemas.
- **Sistema de aire y gases.** Tiene como función principal mediante sus ventiladores (VTF; VRG), el suministro constante de aire para la combustión en el horno de la caldera, y a su vez, expulsar los gases productos de dicha combustión.
- **Sistema de enfriamiento.** Tiene como función, enfriar los distintos equipos del proceso de producción, y el medio refrigerante que utiliza es el agua, y lo hace mediante las bombas (BAE) integradas al sistema.

En el epígrafe anterior se ha hecho mención de los sistemas más importantes, que están directamente implicados en el proceso productivo de energía de la Termoeléctrica, dicha mención se hace con dos objetivos específicos, uno es de dar a conocer información para su conocimiento sobre ellos, y el otro objetivo es, que en dichos sistemas se encuentran los equipos roto-dinámicos, a los cuales se les va a aplicar la metodología diseñada más adelante.

## **1.7 Generalidades sobre las vibraciones.**

Es crucial tener en cuenta el tema de las vibraciones cuando nos referimos a los equipos dinámicos en las organizaciones, ya que de ellas dependen en gran medida el proceso productivo de muchas industrias, existen varias razones importante que están estrechamente vinculadas con las vibraciones, algunas de ellas son, la fiabilidad y vida útil del equipo; eficiencia y rendimiento; garantizar el proceso productivo; salud y seguridad del operario, entre otras razones estas son las más fundamentales.

### **1.7.1 Que son las vibraciones?**

Es toda variación en el tiempo, de una magnitud que describe el movimiento o la posición de un sistema mecánico, cuando esta magnitud es alternativamente mayor o menor que cierto valor promedio o de referencia. (Norma NC-ISO 2041, edicion 2007).

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

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

### **1.7.2 Terminologías asociadas a las vibraciones.**

**Dirección de la medición:** la dirección definida por la posición instantánea, del eje de sensibilidad del transductor del equipo de medición según el diseño del fabricante, en el momento de efectuar la medición. En equipos roto-dinámicos existen dos direcciones preferenciales para la toma de las vibraciones, la Radial o perpendicular al eje y la Axial o en línea con el eje.

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

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

**Vibración radial:** sustituye los términos de vibraciones verticales y horizontales en las mediciones efectuadas en equipos con eje de rotación vertical, sin embargo, las mismas deben tomarse perpendicular al eje de rotación del equipo, desplazadas por un ángulo de  $90^\circ$  entre una y la otra, simbolizándose por la letra **R**. Como convención  $R_v$  en dirección lineal con el anclaje del cojinete y  $R_h$  en dirección perpendicular al anclaje del cojinete.

**Vibración axial:** es la componente de la vibración obtenida mediante la medición realizada, paralela con el eje de rotación del equipo. Sea horizontal o vertical. Por definición se identifica como axial y se simboliza con la letra **A**.

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

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

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

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

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

**Velocidad Efectiva:** es el valor medio cuadrático (Valor Efectivo o **R.M.S**) de la velocidad de la vibración durante un ciclo. Es una magnitud de gran valor criterial, ya que caracteriza la energía de la vibración y sus efectos de fatiga sobre los materiales. Por estas razones se utiliza cada vez más y es la magnitud elegida por las recomendaciones de las Normas Internacionales ISO 2372 para valorar el estado de las vibraciones de los dispositivos en base a su "**Intensidad**" y como es más frecuente en la literatura Inglesa su "**Severidad**" se simboliza con ( $V_{ef}$ ) y se mide en mm/s, aunque existen instrumentos calibrados en cm/s y en pulgadas/s. (pdfcoffee, 2023)

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

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

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

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

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

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

**Valor Pico:** Se utiliza para determinar el valor máximo alcanzado por la amplitud en un intervalo de tiempo dado en el caso de vibraciones no estacionarias o periódicas. Si son vibraciones estacionarias y periódicas coincide con la amplitud y no se utiliza.

**Valor Pico a Pico:** Se utilizan para determinar el valor máximo de la excursión en un intervalo de tiempo dado en el caso de vibraciones no estacionarias o periódicas. En caso de vibraciones estacionarias y periódicas coincide con la excursión y no se utiliza.

**Balance dinámico:** Proceso que tiene como finalidad la disminución de las vibraciones de un equipo rotatorio (sistema rotor-apoyos) en virtud de la disminución de los esfuerzos adicionales cíclicos en los apoyos y de la flexión dinámica del rotor que se producen durante el giro del mismo a causa del desequilibrio de su masa, o eventualmente por deformaciones de otra índole, mediante la instalación de pesos de balance en los planos de balance del rotor.

**Peso aislado:** Es el peso de balance instalado en un solo plano de balance en el caso de rotores con dos o más planos de balance. Se simboliza **Pa**.

**Peso simétrico:** Es el sistema de dos pesos de balance de igual masa e instalados a la misma distancia del eje de rotación y en la misma posición angular en dos planos de balance cercanos a los apoyos del rotor en correspondencia con la primera forma de flexión dinámica del mismo. Se simboliza **Pas**.

**Formas de flexión dinámica:** Se distinguen como primera, segunda, tercera, etc. Y son las que adoptan el rotor al pasar por las velocidades críticas primera, segunda, tercera, etc., respectivamente.

Por su configuración se aproximan a su vez a las formas de oscilaciones libres transversales correspondientes (primera, segunda, tercera, etc.).

**Formas de desbalances:** Se distinguen también como primera, segunda, tercera, etc., en igual correspondencia con las formas de las oscilaciones libres transversales. Para el proceso de balance se considera el desbalance total compuesto de desbalance parciales distribuidos según las diferentes formas.

**Velocidad crítica:** Es el valor de la velocidad de rotación en el cual la frecuencia de las fuerzas excitadoras que surgen en el equipo coincide con la frecuencia propia de oscilaciones libres de alguna parte o conjunto del mismo. Este estado de resonancia produce en las partes o conjuntos interesados un máximo de las vibraciones que se puede observar en la característica de velocidad. Para un equipo dado se pueden presentar en el intervalo desde el estado de reposo hasta su velocidad de operación varias velocidades críticas asociadas a las velocidades críticas teóricas de cada rotor que los compone. Se distinguen en este caso con números ordinales como primera, segunda, tercera, etc. El intervalo de velocidad en que se manifiestan se conoce como intervalo crítico de velocidad.

**Diagrama de Bodé:** Es la gráfica de la característica de velocidad en un diagrama rectangular, asignando los valores de velocidad o frecuencia de rotación (RPM) al eje **x** y los valores del desplazamiento y ángulo de fase de la vibración al eje **y**.

**Diagrama de Nyquist:** Es la gráfica polar de la trayectoria que sigue el extremo del vector del desplazamiento de las vibraciones en el intervalo de velocidad de rotación estudiado.

#### **1.7.2.1 Análisis espectral.**

En el contexto de las vibraciones mecánicas, un espectro se refiere a una representación gráfica de la amplitud de las vibraciones de un sistema en función de la frecuencia. Estos espectros se utilizan para analizar y comprender el comportamiento dinámico de las máquinas.

Son herramientas fundamentales en el análisis de maquinaria, ya que proporcionan información detallada sobre la composición de las vibraciones en una máquina o sistema. Estos espectros permiten identificar las frecuencias dominantes y las amplitudes de las vibraciones, lo que a su vez ayuda a detectar problemas potenciales y a evaluar el estado de la maquinaria.

En un espectro de vibraciones, el eje horizontal representa la frecuencia de las vibraciones (generalmente en Hz o ciclos por minuto), y el eje vertical representa la amplitud de las vibraciones (generalmente en unidades como micrómetros o metros por segundo). La interpretación de un espectro de vibraciones implica identificar picos o picos significativos en el espectro, los cuales representan las frecuencias predominantes de las vibraciones.

Por lo general, un espectro de vibraciones puede revelar información sobre diversas características de la maquinaria, incluyendo:

- Frecuencias naturales: Las frecuencias resonantes u otras frecuencias modales de la máquina o la estructura, las cuales pueden indicar potenciales problemas de resonancia o problemas estructurales.
- Componentes giratorios: En el caso de maquinaria rotatoria, el espectro puede mostrar picos armónicos relacionados con la velocidad de rotación de los componentes, lo que puede ayudar a identificar desequilibrios, problemas de alineación, problemas en rodamientos, entre otros.

En resumen, los espectros de vibraciones proporcionan una representación completa y detallada de las vibraciones en una máquina rotatoria, lo que permite a los ingenieros y técnicos analizar y diagnosticar problemas potenciales, y tomar decisiones informadas sobre el mantenimiento y el rendimiento de la maquinaria.

En este trabajo nos apoyaremos en el análisis espectral, para poder identificar las posibles causas y problemas vibratorios que puede tener una máquina rotatoria, en la Termoeléctrica. **Fuente:** (A-MAQS, 2022).

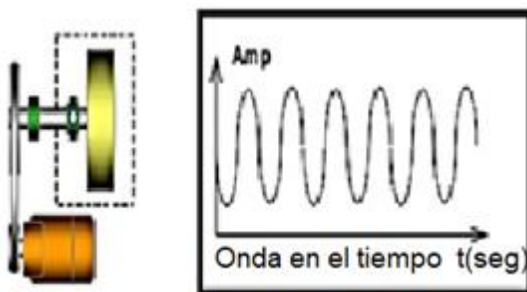
**Nota:** Ver anexos (4, 5 y 6 ) para una mejor comprensión sobre este tema.

#### **1.7.2.2 Comportamientos espectrales característicos de la mayoría de los efectos que se pueden presentar en los equipos dinámicos.**

A continuación haremos mención de algunos factores importantes que originan las vibraciones en las máquinas roto-dinámicas.

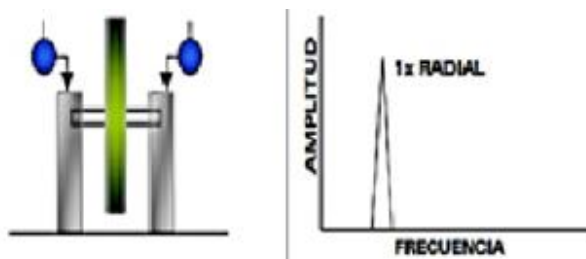
El siguiente epígrafe se refiere a los diferentes comportamientos espectrales que se manifiestan en los equipos dinámicos, producto a los efectos que se producen durante su explotación. Esta información permite realizar los análisis específicos, teniendo en cuenta las mediciones de los parámetros de estados, en condiciones normales de funcionamiento, los aspectos de parámetros según el fabricante y el comportamiento según las mediciones que se realizan periódicamente. (Azima DLI, 1990 -2010)

- **Desbalance. Ver Figura 1.5**



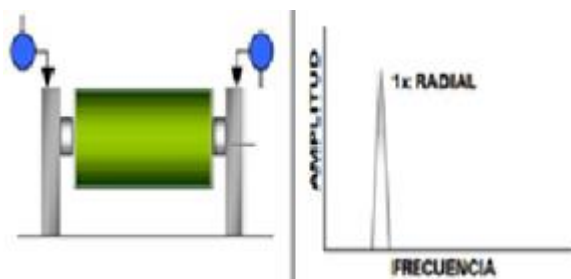
**Figura 1.5 .** Representacion del desbalance

**Estático:** Producido generalmente por desgaste radial superficial no uniforme en rotores en los cuales su largo es despreciable en comparación con su diámetro. El espectro presenta vibración dominante con una frecuencia igual a 1x RPS del rotor. Se recomienda para corregir la falla balancear el rotor en un sólo plano (en el centro de gravedad del rotor) con la masa adecuada y en la posición angular calculada con un equipo de balanceo. Debe consultar a un experto en balanceo de máquinas, ver Figura 1.6, (Azima DLI, 1990 -2010)



**Figura 1.6 .** Desbalance Estático

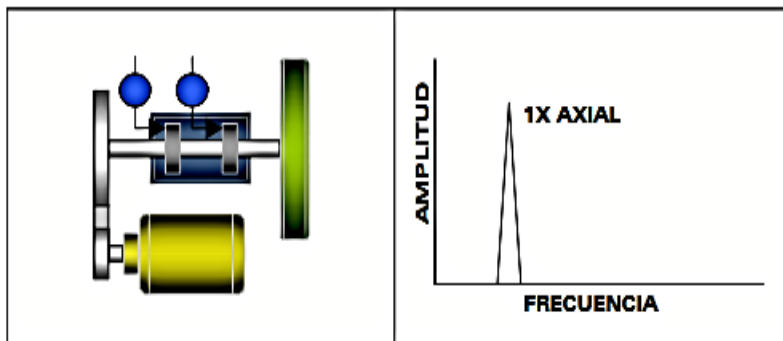
**Dinámico:** El desbalanceo dinámico ocurre en rotores medianos y largos. Es debido principalmente a desgastes radiales y axiales simultáneos en la superficie del rotor. El espectro presenta vibración dominante y vaivén simultáneo a frecuencia igual a 1x RPS del rotor. Se recomienda para corregir la falla balancear el rotor en dos planos, con las masas adecuadas y en las posiciones angulares calculadas con un equipo de balanceo dinámico. Consulte a un experto en balanceo de rotores, ver Figura 1.7, (Azima DLI, 1990 -2010)



**Figura 1.7 .** Desbalance Dinámico

- **Rotor colgante.**

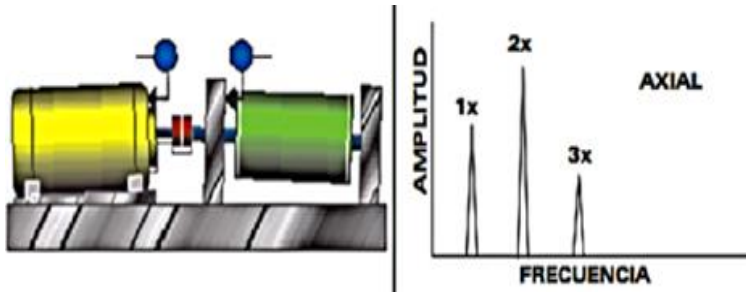
Ocurre en rotores que se encuentran en el extremo de un eje. Es producido por desgaste en la superficie del rotor y doblamiento del eje. El espectro presenta vibración dominante a 1x RPS del rotor, muy notoria en dirección axial y radial. Para corregir la falla, primero debe verificarse que el rotor no tenga excentricidad, ni que el eje esté doblado. Luego debe realizarse el balanceo adecuado. Consulte a un experto en balanceo de máquinas, ver Figura 1.8, (Azima DLI, 1990 -2010)



**Figura 1.8 .** Representacion del rotor colgante

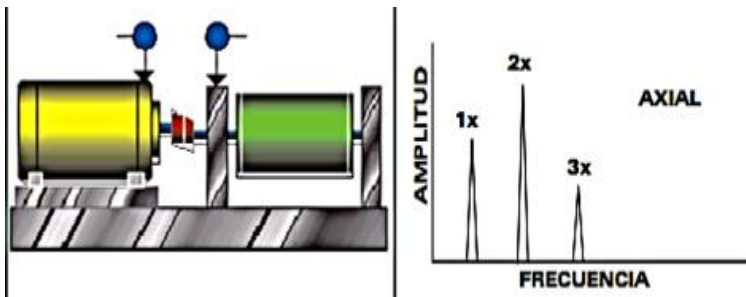
- **Desalineamiento.**

**Angular:** Ocurre cuando el eje del motor y el eje conducido unidos en el acople, no son paralelos. Caracterizado por altas vibraciones axiales. 1x RPS y 2x RPS son las más comunes, con desfase de 180 grados a través del acople. También se presenta 3x RPS. Estos síntomas también indican problemas en el acople. Para corregirlo, el conjunto motor-rotor debe alinearse. Debe emplearse un equipo de alineación adecuado, ver Figura 1.9, (Azima DLI, 1990 -2010)



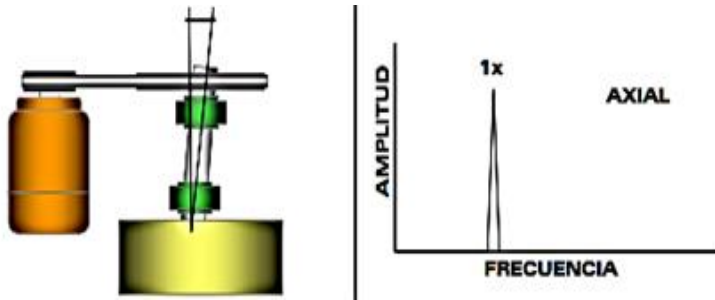
**Figura 1.9 .** Desalineamiento angular

**Paralelo:** Los ejes del motor y del rotor conducido están paralelos, pero no son colineales. Se pueden detectar altas vibraciones radiales a 2x RPS, predominante, y a 1x RPS, con desfase de 180 grados a través del acople. Cuando aumenta la severidad, genera picos en armónicos superiores (4x, 8x). Se debe alinear el conjunto para corregir el daño. Debe emplearse un equipo de alineación adecuado, ver Figura 1.10, (Azima DLI, 1990 -2010)



**Figura 1.10 .** Desalineamiento paralelo

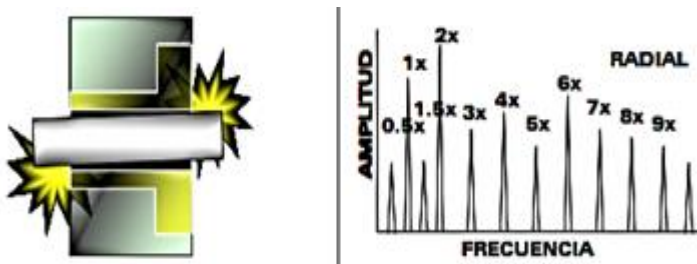
**Entre chumaceras:** En una máquina con transmisión de poleas, la mala posición de las chumaceras puede evitar que el eje se acomode correctamente, lo cual genera vibraciones anormales en sentido axial y radial. Excitación del pico representativo de la velocidad (1x RPS), especialmente en sentido axial. Es necesario hacer una verificación de que las chumaceras queden completamente paralelas entre sí, ver Figura 1.11, (Azima DLI, 1990 -2010)



**Figura 1.11 .** Desalineamiento entre chunaceras

- **Holgura mecánica. Eje – agujero.**

**Holgura mecánica:** Aflojamiento de manguitos, tolerancias de manufactura inadecuadas (con juego), y holgura entre el impulsor y su eje en bombas. Causa un truncamiento en la forma de onda en el dominio del tiempo. La falla genera múltiples armónicos y sub armónicos de 1x RPS, destacándose los armónicos fraccionarios  $1/2 x$ ,  $1/3 x$ ,  $1.5 x$ ,  $2.5 x$ ,... Frecuentemente la fase es inestable y el nivel máximo tiende a una dirección notable realizando lecturas radiales espaciadas 30 grados entre sí. Se recomienda verificar la colocación de los manguitos y los juegos eje-agujero cercano al punto de medición. Igualmente, los ajustes de rotor, ver Figura 1.12, (Azima DLI, 1990 -2010)

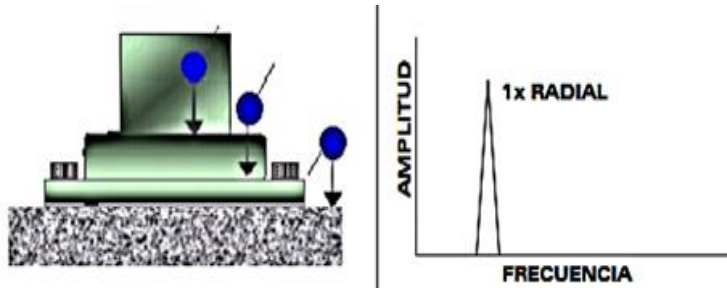


**Figura 1.12 .** Holgura mecánica. Eje – agujero

- **Soltura estructural.**

**Soltura estructural:** Ablandamiento o desplazamiento del pie de la máquina, por holgura en los pernos de la base o por deterioro de los componentes de la sujeción.

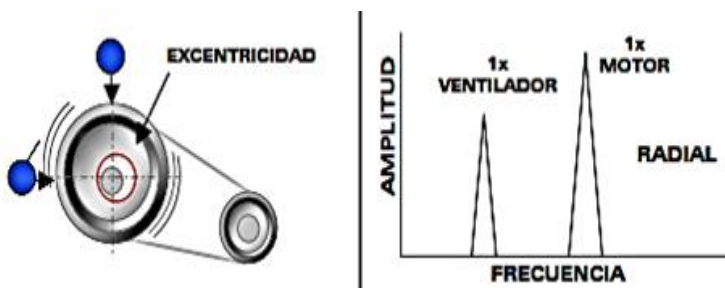
El espectro presenta vibración a 1x RPS en la base de la máquina con desfase a 180 grados entre los elementos sujetos en el anclaje, altamente direccional en la dirección de la sujeción. Se recomienda primero revisar el estado de fatiga del pie de máquina (rajaduras, corrosión). Luego debe verificarse el estado de los sujetadores y por último el estado de la cimentación, ver Figura 1.13, (Azima DLI, 1990 -2010)



**Figura 1.13 .** Holgura mecánica. Eje – agujero

- **Excentricidad rotacional.**

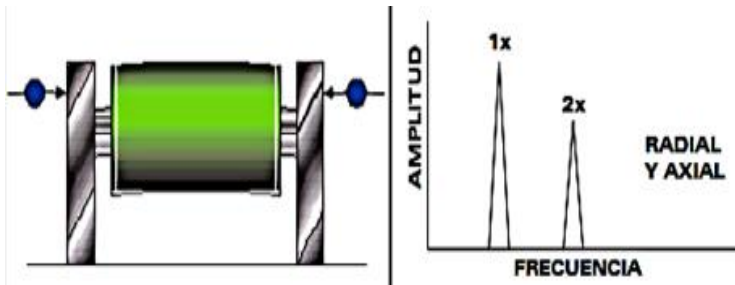
**Excentricidad:** Fácilmente confundible con desbalance. Ocurre cuando el centro de rotación no coincide con el centro geométrico en una polea o engranaje. La mayor vibración ocurre a 1x RPS del elemento con excentricidad, en dirección de la línea que cruza por los centros de los dos rotores. Para corregir la falla, el rotor debe ser re ensamblado o remplazado. (Tratar de balancear el rotor excéntrico resulta en una disminución del nivel de vibración, en una dirección, y un aumento considerable en la otra), ver Figura 1.14, (Azima DLI, 1990 -2010)



**Figura 1.14 .** Representacion de exentricidad

- **Pandeo (Rotor o eje pandeado).**

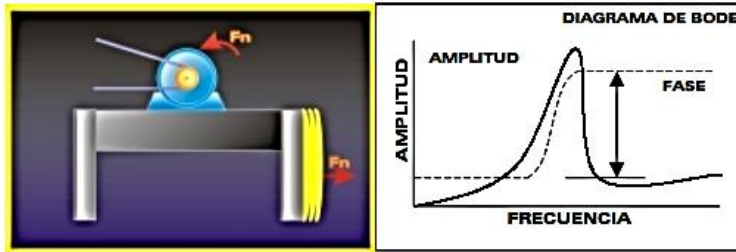
**Pandeo:** Es más común en ejes largos. Se produce por esfuerzos excesivos en el eje. Genera vibración axial alta con diferencia de fase de 180 grados medida en los dos soportes del rotor. La vibración dominante es de 1x RPS si el pandeo está cercano al centro del eje, y es de 2x RPS si el pandeo está cerca del rodamiento. Para corregir la falla, el eje debe rectificarse o cambiarse, ver Figura 1.15, (Azima DLI, 1990 -2010)



**Figura 1.15 . Rotor o eje pandeado**

- **Resonancia.**

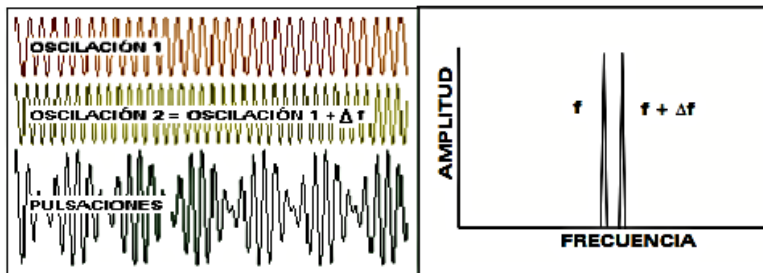
**Resonancia:** Ocurre cuando la velocidad de una fuerza conducida iguala la frecuencia natural de una estructura o una parte de ella. Puede causar dramáticas amplificaciones de la amplitud lo que puede terminar en fallas prematuras y posiblemente catastróficas. Presenta un cambio de fase de 90° por resonancia y 180° cuando lo sobrepasa. Se requieren cambios periódicos de localización de la frecuencia natural, ver Figura 1.16, (Azima DLI, 1990 -2010)



**Figura 1.16 . Resonancia**

- **Pulsaciones.**

**Pulsaciones:** Sucede cuando una fuente de vibración interfiere con otra. Generalmente se produce por dos máquinas cercanas que trabajan casi a la misma velocidad. El espectro muestra dos picos con frecuencias similares. La diferencia de estas da como resultado una pulsación. La ilustración izquierda representa estas frecuencias en el dominio del tiempo y la suma de ambas. Para solucionar el problema se deben aislar estructuralmente las máquinas en conflicto, ver Figura 1.17, (Azima DLI, 1990 -2010)



**Figura 1.17. Pulsaciones**

## **1.8 Conclusiones parciales del capítulo I.**

- Se realizó una revisión bibliográfica referente a las generalidades sobre el mantenimiento en las organizaciones, donde se abordaron varios aspectos importantes.
- Se caracterizó el mantenimiento en la central Termoeléctrica “Carlos Manuel de Céspedes” y se detalló, la falla, como un aspecto determinante en la capacidad operativa de trabajo de los equipos roto-dinámicos, lo cual incide en las valoraciones de sus posibilidades para su explotación sin defectos.
- Se tuvieron en cuenta los diferentes sistemas indispensables que componen el sistema productivo de la Termoeléctrica “Carlos Manuel de Céspedes”, así como sus funciones.
- Se puntualizaron los conceptos y terminologías, asociadas al parámetro Vibraciones, evidenciando que su aplicación y análisis es determinante en las nuevas técnicas de mantenimiento pro-activo, para detectar y eliminar las posibles causas que pueden provocar las fallas que ocurren en los equipos roto-dinámicos.
- Se hizo un enfoque más detallado en lo referente al análisis espectral, siendo este un punto vital dentro del parámetro vibraciones.

## **CAPITULO II. METODOLOGÍA PARA LA APLICACIÓN DEL MANTENIMIENTO PROACTIVO UTILIZANDO EL MÉTODO DE ANÁLISIS DE VIBRACIONES A EQUIPOS ROTATORIOS DE LA CENTRAL TERMOELÉCTRICA “CARLOS MANUEL DE CÉSPEDES”.**

Teniendo en cuenta que las averías en los equipos dinámicos de la termoeléctrica, son uno de los problemas principales que causan perdidas en el sistema productivo, así como la indisponibilidad en ella, se determinó diseñar y organizar una metodología para la aplicación del diagnóstico en el mantenimiento proactivo, que sea capaz de mitigar en gran medida las averías de dichos equipos, y de esa forma lograr un aumento en la estabilidad del proceso productivo de la central.

### **2.1 – Secuencia metodológica a tener en cuenta para la aplicación del diagnóstico en equipos rotatorios en la Central Termoeléctrica “Carlos Manuel de Céspedes”.**

Para la elaboración de esta metodología y luego poder aplicarla en el diagnóstico de equipos rotatorios, se llevaron a cabo una serie de pasos a seguir, los cuales son mencionados a continuación:

- 1 - Diagnóstico en el sistema organizativo del mantenimiento en la Central Termoeléctrica “Carlos Manuel de Céspedes”.
- 2 - Clasificación de los equipos según su importancia productiva y selección de los tipos de mantenimientos a aplicar para cada caso.
- 3 - Determinación de los equipos a evaluar a partir de la cantidad de averías.
  - 3.1 - Aplicación de la Técnica de “Pareto”.
- 4 - Métodos y Técnicas aplicadas para la determinación de Parámetros de Estado a controlar durante la aplicación del Diagnóstico.

4.1 - Resultados del Mantenimiento.

4.2 - Aplicación Técnica del Análisis Causa–Efecto.

4.3 - Selección de la instrumentación.

4.4 - Patrones de referencias.

4.5 - Determinación de los puntos de medición de las vibraciones en los equipos dinámicos.

4.6 - Periodicidad de las mediciones e inspección en los equipo.

4.7 - Análisis de los resultados de la medición de las vibraciones en los equipos. Interpretación espectral.

A continuación, se hará una explicación de en qué consisten cada uno de los aspectos que componen los pasos para la metodología a aplicar en el mantenimiento proactivo por diagnóstico en las máquinas rotatorias de la termoeléctrica.

#### **2.1.1 Diagnóstico en el sistema organizativo del mantenimiento en la Central Termoeléctrica “Carlos Manuel de Céspedes”.**

El primer paso, para llevar a cabo el diagnóstico, es analizar todos los aspectos de la entidad que están estrechamente relacionados con el mantenimiento, el cual constituye un apartado importante en este trabajo.

Para realizar este diagnóstico, es necesario tener en cuenta una serie de aspectos fundamentales, los cuales se mencionan a continuación:

**1.** Como primer aspecto muy importante a tener en cuenta, es el equipo de trabajo que va a llevar a cabo el diagnóstico, el cual está integrado por técnicos, especialistas y obreros más capaces, dentro del desarrollo del mantenimiento.

2. Un segundo aspecto a tener en cuenta, es la realización de proyectos de trabajos en casos de ser necesarios, dirigidos al conocimiento del sistema y métodos que vamos a aplicar.

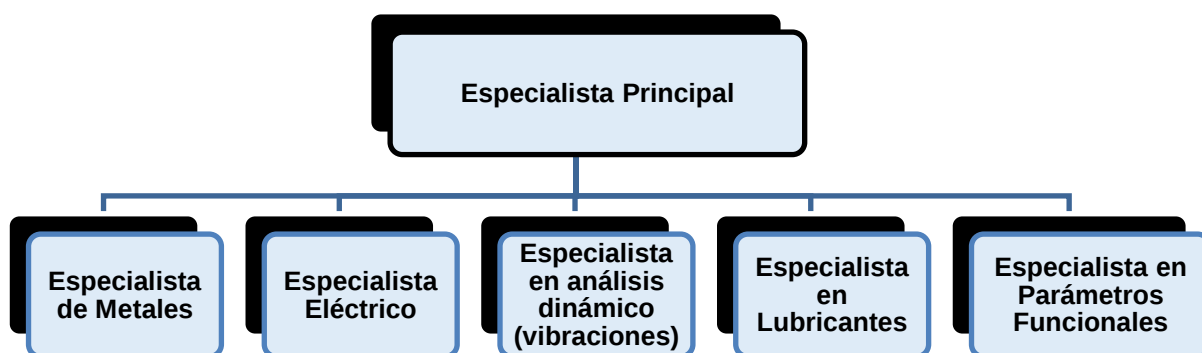
3. Y como un tercer aspecto a tener en cuenta, es determinar los problemas fundamentales a partir de datos estadísticos y estudios de archivos existentes que reflejan los resultados de múltiples mantenimientos ejecutados en la Termoeléctrica.

Durante el trabajo en equipo para el análisis, se aplican las conocidas tormentas de ideas con grupos de expertos, encuestas dirigidas al tema a tratar, entrevistas, entre otros, mediante las cuales se aportan las mejores experiencias en temáticas similares, tratando en su caso de aplicarlas y mejorarlas.

### 2.1.2. Estructura organizativa y parámetros del diagnóstico.

El completamiento del grupo de diagnóstico con una estructura que abarcara todas las variantes de control de parámetros de estado para el diagnóstico, creada en el año 2010, permite con las experiencias adquiridas establecer un diagnóstico de estado técnicamente profesional y al alcance de los estatus actuales del desarrollo industrial. Para ello fue imprescindible una inversión que implicara, la preparación profesional de los integrantes de la nueva estructuración de trabajo, así como, la adquisición de instrumentos que dieran respuesta a las nuevas necesidades del diagnóstico.

En la **Figura 2.1**, se relaciona la nueva estructura constituida por 6 especialistas en la actividad del diagnóstico.

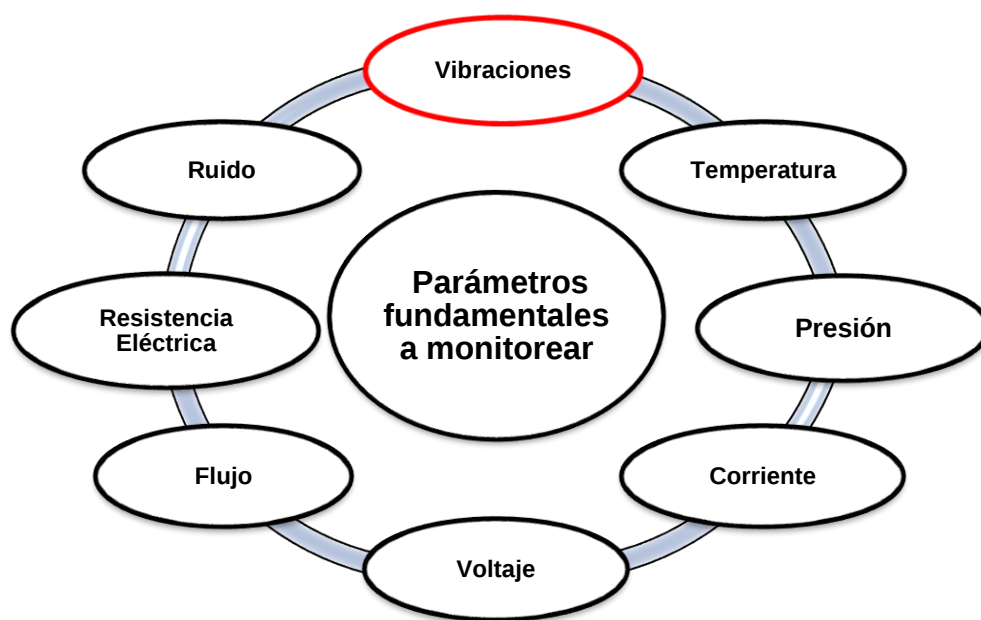


**Figura 2.1** Estructura del grupo de diagnóstico actual. **Fuente:** (Elaboración Propia).

#### 2.1.2.1. Parámetros de estado a controlar.

Aunque el parámetro fundamental que se va a tener en cuenta serán las **vibraciones**, existen otros parámetros importantes que se van a evaluar por el grupo de diagnóstico.

En la **Fig.2.2** a continuación, se presentan los parámetros de estado fundamentales a tener en cuenta a partir de un sistema de monitoreo planificado para la actividad del diagnóstico.



**Fig. 2.2** Parámetros de estado a controlar. Fuente: (Elaboración Propia).

#### 2.1.3 Clasificación de los equipos según su importancia productiva y selección de los tipos de mantenimientos a aplicar para cada caso.

Para la ejecución de cualquier acción que tenga que ver con la realización de los mantenimientos, la clasificación de los equipos y sistemas constituye uno de los aspectos elementales, ya que se refiere a la organización y aplicación técnica sobre los mismos. Esto permite así determinar el tipo de mantenimiento a emplear a cada equipo o sistema en particular.

Atendiendo a su importancia productiva, los equipos se les pueden dar la siguiente clasificación, (Portuondo Pichardo, 1990)

Muy importantes o fundamentales. **(A)**

Normales o convencionales. **(B)**

Auxiliares o poco convencionales. **(C)**

Luego de conocer los anteriores criterios de clasificaciones **(A; B; C)**, a continuación en la **tabla 2.1** se muestra una guía metodológica donde se exponen dichos factores y el método a aplicar según el grado de complejidad e importancia de los equipos o sistemas. Este procedimiento es aplicado a todos los equipos de la central termoeléctrica, los cuales se evalúan atendiendo a un grupo de requerimientos que consta de 11 puntos, (este sistema se aplica a partir del trabajo en equipo o el muestreo con los especialistas de mayor experiencia, mediante la utilización de los datos propios de cada equipo y/o sistema que se encuentran en los archivos de la central termoeléctrica), y que van desde aspectos selectivos y directivos hasta aspectos generales. Teniendo en cuenta estos aspectos se ubican los equipos y/o sistemas en tres columnas **(A, B, C)**.

Atendiendo a esta guía metodológica, se puede seleccionar así el tipo de mantenimiento adecuado a aplicar a cada equipo, según el grado de complejidad e importancia productiva que estos tengan para la central termoeléctrica.

**Tabla 2.1 - Guía metodológica aplicada para la clasificación de equipos y selección del tipo de mantenimiento, (Leiva Castro, 1996).**

Dónde: **TH** - Turnos por horas; **TD** - Turnos por días; **HDS** - Horas del día solamente

| ASPECTOS SELECTIVOS                      |    |     |  | A                                                                                 | B                                                                                                                                                        | C                                                                       |
|------------------------------------------|----|-----|--|-----------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| 1-Intercambiabilidad                     |    |     |  | Irreemplazable                                                                    | Reemplazable                                                                                                                                             | Intercambiable                                                          |
| 2-Importancia Productiva                 |    |     |  | Imprescindible (50%)                                                              | Limitante (10-50%)                                                                                                                                       | Convencional (menor 10%)                                                |
| 3-Régimen de Operación                   |    |     |  | Continuo                                                                          | Seriado                                                                                                                                                  | Alterno                                                                 |
| 4-Nivel de Utilización                   |    |     |  | Muy Utilizado                                                                     | Utilización Media                                                                                                                                        | Esporádica                                                              |
| TD                                       | TH | HDS |  |                                                                                   |                                                                                                                                                          |                                                                         |
|                                          |    |     |  |                                                                                   |                                                                                                                                                          |                                                                         |
| 5-Nivel Consumo Energético               |    |     |  | Alto (+20%)                                                                       | Medio (5-20%)                                                                                                                                            | Bajo (Menos 5%)                                                         |
| ASPECTOS DIRECTIVOS                      |    |     |  |                                                                                   |                                                                                                                                                          |                                                                         |
| 6-Complejidad del Mantenimiento          |    |     |  | Complejidad Alta                                                                  | Complejidad Media                                                                                                                                        | Complejidad Simple                                                      |
| 7-Conservabilidad                        |    |     |  | Condiciones Especiales                                                            | Protegido                                                                                                                                                | Normal                                                                  |
| 8-Automatización                         |    |     |  | Automático                                                                        | Semi - Automático                                                                                                                                        | Mecánico                                                                |
| ASPECTOS GENERAL                         |    |     |  |                                                                                   |                                                                                                                                                          |                                                                         |
| 9-Valor de Equipo                        |    |     |  | Alto                                                                              | Promedio                                                                                                                                                 | Bajo                                                                    |
| 10- Factibilidad para el Aprovechamiento |    |     |  | Mala                                                                              | Regular                                                                                                                                                  | Buena                                                                   |
| 11-Seguridad de Operación                |    |     |  | Peligroso                                                                         | Influyente                                                                                                                                               | Poco influyente                                                         |
| TABLA RESUMEN<br>Equipo _____            |    |     |  | Máxima Disponibilidad. -<br>Preferencia                                           | Reducir Costos sin perder disponibilidad.                                                                                                                | Reducir al mínimo los costos de mantenimiento.                          |
| Parámetro                                |    |     |  |                                                                                   | - Se usa preventivo en todas sus gamas: servicio diario, trabajo periódico etc.                                                                          | - No se usa el Mantenimiento Predictivo.                                |
| 1-                                       |    |     |  | Predictivo y Preventivo fuerte que evite eventualidades.                          |                                                                                                                                                          |                                                                         |
| 2-                                       |    |     |  |                                                                                   |                                                                                                                                                          |                                                                         |
| 3-                                       |    |     |  | - Frecuencias altas de Inspección y revisiones engrases Limpiezas.                | - Frecuencia media de inspecciones y revisiones engrases limpiezas y consumibles- Más libertad al correctivo en dependencia de la holgura de la máquina. | - Se aplica el preventivo con baja frecuencia en engrase, limpieza etc. |
| 4-                                       |    |     |  |                                                                                   |                                                                                                                                                          |                                                                         |
| 5-                                       |    |     |  | Ajuste Verificación de dimensiones, cambios de piezas                             |                                                                                                                                                          | - Abundante el mantenimiento correctivo pues existe gran holgura.       |
| .                                        |    |     |  |                                                                                   |                                                                                                                                                          |                                                                         |
| .                                        |    |     |  |                                                                                   |                                                                                                                                                          |                                                                         |
| 11-<br>Total                             |    |     |  | - Máxima Prioridad si ocurre un Fallo.<br><br>- Registro y seguimiento del Fallo. |                                                                                                                                                          |                                                                         |

#### 2.1.4 Determinación de los equipos a evaluar a partir de la cantidad de averías.

**Fuente:** Registros estadísticos de los mantenimientos en la Termoeléctrica.

Una vez concluida la clasificación de los equipos según su importancia productiva, se procede al próximo paso a tener en cuenta, que es la determinación de los equipos a evaluar según la cantidad de averías que ellos hayan presentado. Para ello utilizaremos la siguiente **Tabla.2.2**, la cual nos va a mostrar esos datos estadísticos que nos permitirá poder hacer dicha clasificación.

**Tabla 2.2. Representación estadística de la cantidad de averías de los diferentes equipos.**

**Fuente:** Elaboración propia a partir de los datos estadísticos de la Termoeléctrica.

| SISTEMAS<br>O<br>EQUIPOS | AVERÍAS DURANTE ESTE PERÍODO |      |      |      |      |      |      |      | TOTAL |
|--------------------------|------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
|                          | 2013                         | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 |       |
| ¿.....?                  |                              |      |      |      |      |      |      |      |       |
| ¿.....?                  |                              |      |      |      |      |      |      |      |       |
| ¿.....?                  |                              |      |      |      |      |      |      |      |       |
| ¿.....?                  |                              |      |      |      |      |      |      |      |       |
| ¿.....?                  |                              |      |      |      |      |      |      |      |       |
| TOTAL                    |                              |      |      |      |      |      |      |      |       |

Para esto, es necesario realizar el estudio de todas las pérdidas por las averías de dichos equipos categorizados, ya que por causa de estos problemas provocan indisponibilidad en la central termoeléctrica. Para este análisis es necesario tener en cuenta los últimos 6 años como mínimo.

#### 2.1.5 Aplicación de la técnica de “Pareto”.

La Técnica de Pareto o también conocida como regla del 80/20, es un concepto que se utiliza en diversos campos, incluyendo la economía, la gestión empresarial, la ciencia de datos, la ingeniería y la resolución de problemas en general. Este economista italiano (Vilfredo Pareto), señaló que en numerosas situaciones que

aproximadamente el 80% de los efectos, provienen del 20% de las causas. **Fuente:** (Povedano, 2021)

Esta técnica ha demostrado ser muy efectiva en diversas áreas, y por eso vamos a aplicarla en la investigación de este trabajo, para así poder identificar los problemas de mayor relevancia que necesitamos conocer.

Una vez que ya se tiene el modelo con la cantidad de averías por equipos a evaluar, se procede a aplicar dicha técnica, como se muestra en el siguiente modelo de la **Tabla 2.3**.

**Tabla 2.3.** Modelo para aplicar la técnica de Pareto.

**Fuente:** Elaboración propia

| SISTEMAS O EQUIPOS | TOTAL DE AVERIAS | TOTAL % | PARETO % |
|--------------------|------------------|---------|----------|
| ¿.....?            |                  |         |          |
| ¿.....?            |                  |         |          |
| ¿.....?            |                  |         |          |
| ¿.....?            |                  |         |          |
| ¿.....?            |                  |         |          |

En la **tabla 2.3** se muestra un modelo que se debe llevar a cabo para poder realizar el diagrama de Pareto más adelante, **ver anexo ( )**

En la primera columna se colocan todos los sistemas o equipos a evaluar, en la segunda columna, a partir del modelo de la **tabla 2.2**, se colocan el total de averías que se ha producido en cada equipo a lo largo del período de estudio, en la tercera columna se coloca el total de averías en porciento y en la última columna se coloca la frecuencia acumulada del total de averías en porciento.

### **2.1.6 Métodos y Técnicas aplicadas para la determinación de Parámetros de Estado a controlar, durante la aplicación del Diagnóstico en equipos dinámicos.**

Una vez determinados los equipos que a evaluar según la cantidad que de averías que estos poseen, el próximo paso es , la determinación de los parámetros a controlar durante la aplicación del diagnóstico, los cuales definen el estado de los sistemas y equipos objetos de estudio. La determinación de estos parámetros se desarrollará a través de 5 nuevos pasos, los cuales se muestran y explican a continuación:

- 1 - Resultados del Mantenimiento.
- 2 - Aplicación Técnica del Análisis Causa–Efecto.
- 3 - Determinación de los instrumentos necesarios y organización del sistema de monitoreo para el diagnóstico en equipos dinámicos.
- 4 - Determinación de Parámetros de estado a controlar para el diagnóstico.

#### **2.1.6.1 Resultados del mantenimiento.**

Lo primero que se debe tener en cuenta para determinar los parámetros que se controlaran durante la aplicación del diagnóstico, es la elaboración de un programa a partir de los estudios realizados acerca de los mantenimientos desarrollados en la entidad, el cual es utilizado para obtener un registro de todo lo relacionado con los resultados de cada mantenimiento realizado en la central termoeléctrica durante el periodo de estudio seleccionado y así tener en cuenta todos los defectos y averías por la que ha atravesado cada sistema. Esto permite determinar cuáles equipos son los que presentan frecuentemente más fallas y a su vez la relación con los parámetros y síntomas que estos presentan.

Una vez que tengamos los registros de los mantenimientos, los utilizaremos para la aplicación del análisis Causa –Efecto, el cual será argumentado a continuación.

#### **2.1.6.2 Aplicación del método Causa-Efecto.**

Luego de la obtención de todo el historial de todos los mantenimientos realizados y todas las fallas detectadas a partir de estos, el próximo paso es el desarrollo del análisis Causa - Efecto.

El propósito del diagrama de causa y efecto, también llamado diagrama de causa-efecto, de Ishikawa o de espina de pescado (por su apariencia) es poner en orden las teorías respecto a las causas de un problema; para crear el diagrama (ver **figura 2.1**), el efecto (el síntoma observado, el problema que se detecta) se anota en el extremo de una línea horizontal. Las causas posibles, es decir, las teorías para explicar tal efecto, se van añadiendo sobre el cuerpo de la línea principal, incorporando líneas a la línea principal para separar las causas independientes.

Cuando se analiza en detalle un problema complejo, normalmente surgen muchas teorías para explicar las causas, para no congestionar la línea principal y para organizar las causas de los efectos, las líneas que inciden sobre la línea principal se organizan en seis categorías generales que cubren la mayoría de los casos de problemas técnicos y operativos:

- Personal: causas atribuibles a las personas, su capacidad y motivación.
- Métodos: las debidas a la forma y procedimientos al ejecutar el trabajo.
- Materiales: causas que provienen de los objetos que se transforman.
- Equipo: causas que se deben a la maquinaria y las herramientas usadas en el trabajo.
- Ambiente: causas que rodean al proceso y que no es posible controlar.
- Medición: causas atribuibles a instrumentos y métodos usados para medir los efectos visibles del problema.

Los diagramas de espina de pescado a menudo se utilizan en la evaluación de las necesidades, para ayudar a ilustrar y/o reflejar las relaciones existentes entre varias causas potenciales de un problema (efectos). Dicho diagrama fue creado por **Kaoru Ishikawa**.



**Figura 2.1 - Diagrama causa-efecto de Ishikawa, o de espina de pescado.**

**Fuente:** (rojotse, 2023)

### **2.1.6.3 Determinación de los instrumentos necesarios, y organización del sistema de monitoreo para el diagnóstico en equipos dinámicos.**

Luego de apoyarse en el diagrama de Ishikawa para lograr un análisis de las posibles causas que pueden provocar las averías en los equipos y/o sistemas, debemos continuar con un paso indispensable, el cual es la selección de la instrumentación adecuada a utilizar para determinar y controlar los parámetros de estado respectivos en cada equipo.

Para dicha selección de los instrumentos, debemos de tener en cuenta algunos aspectos importantes como los mencionados a continuación:

- El tipo de mantenimiento a ejecutar.

- Tipos de quipos o sistemas al que se les va a ejecutar el mantenimiento seleccionado.
- Tener en cuenta cuales van a ser los parámetros de estado a evaluar en los equipos o sistemas.

Una vez tenido en cuenta los aspectos mencionados anteriormente, y en conjunto con las normativas y necesidades de los trabajos planificados, ya podemos hacer una correcta selección de los instrumentos a utilizar en el mantenimiento.

#### **2.1.6.4. Patrones de referencias a tener en cuenta en los niveles de vibración.**

**Fuente:** (NC- ISO10816-1, 1995, edición 2005)

En los equipos roto-dinámicos hay un aspecto fundamental a tener en cuenta cuando se evalúan las vibraciones en ellos, nos referimos a los **patrones de referencias**, o sea, a los límites permisibles de vibraciones que tienen cada equipo en particular, esto quiere decir de que cada equipo tiene un rango nominal de vibraciones, donde dicho equipo estando en operación normal y sin problemas que lo afecten, las vibraciones deben de permanecer en dicho rango permisible.

Pero para tener en cuenta estos patrones de referencias, debemos primeramente identificar a que clase pertenece el equipo a diagnosticar, ya que existen cuatro clases dentro de estas máquinas rotatorias, las cuales mencionaremos a continuación:

**Clase I:** Partes individuales de motores y máquinas conectadas integralmente a la máquina en sus condiciones normales de operación (los motores eléctricos de hasta 15 kW son ejemplos típicos de máquinas en esta categoría).

**Clase II:** Máquinas de tamaño medio (típicamente, motores eléctricos con salida entre 15 kW y 75kW) sin fundamentos especiales, máquinas o motores montados rígidamente (de hasta 300 kW)

**Clase III:** Grandes motores primarios y otras grandes máquinas con masas rotatorias montadas sobre fundamentos rígidos y pesados, que son relativamente rígidos en la dirección en la que se miden las vibraciones.

**Clase IV:** Grandes motores primarios y otras grandes máquinas con masas rotatorias montadas sobre fundamentos relativamente blandos en la dirección en la que se miden las vibraciones (por ejemplo, grupos turbogeneradores y turbinas de gas con salidas mayores de 10 MW).

Luego de tener conocimiento de las diferentes clases de las máquinas rotatorias que existen, procedemos a verificar las características de la máquina a diagnosticar, y de esa manera sabremos a que clase pertenece, estas características las podemos encontrar plasmadas en la misma máquina, y en caso de no ser así, pues procederemos a buscar en la documentación que el fabricante anexa a dicha máquina.

Una vez teniendo conocimiento de la clase a la cual pertenece según las características del equipo, solo nos queda saber los patrones de referencias que podemos usar para el diagnóstico del equipo seleccionado, y para eso nos apoyaremos en la siguiente **Figura 2.2**

|                            |                |                |                |                |
|----------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 45.00                      | No Permissible | No Permissible | No Permissible | No Permissible |
| 28.00                      |                |                | Límite         | Límite         |
| 18.00                      |                |                |                |                |
| 11.20                      |                |                |                |                |
| 7.10                       |                |                | Límite         | Admisible      |
| 4.50                       | Admisible      |                |                |                |
| 2.80                       | Admisible      | Admisible      | Normal         | Normal         |
| 1.80                       |                |                |                |                |
| 1.12                       |                |                |                |                |
| 0.71                       |                |                |                |                |
| 0.45                       |                |                |                |                |
| 0.28                       |                |                |                |                |
| ↑<br>Vel.<br>[mm/s]<br>RMS | Clase I        | Clase II       | Clase III      | Clase IV       |

**Figura.2.2. Patrones de referencias según la clase.**

En la figura mostrada anteriormente, podemos ver cuáles son los rangos de referencias permisibles para cada clase de máquina rotatoria, o sea, en la columna de la izquierda podremos ver la escala de los rangos permisibles, y los colores de

las demás columnas nos dice cuáles son los límites de los rangos que pertenecen a cada clase.

Por ejemplo, en la **clase I**, la cual tiene como rangos de referencia los siguientes:

- ~ Rango normal (verde), esta entre 0.28 y 0.71 RMS (mm/s)
- ~ Rango admisible(amarillo claro), esta entre 0.71 y 1.80 RMS (mm/s)
- ~ Rango limite (amarillo oscuro), entre 1.80 y 4.50 RMS (mm/s)
- ~ Rango no admisible ( rojo), mayor de 4.50 RMS (mm/s)

**Nota:** Como se puede observar en la figura, a medida de que aumenta el número de clase, aumenta también los rangos permisibles, esto quiere decir, que mientras más grande sea la maquina rotatoria, más amplios son los rangos de tolerancia.

### **2.1.7 Determinación los puntos de medición para el diagnóstico de vibraciones en equipos dinámicos.**

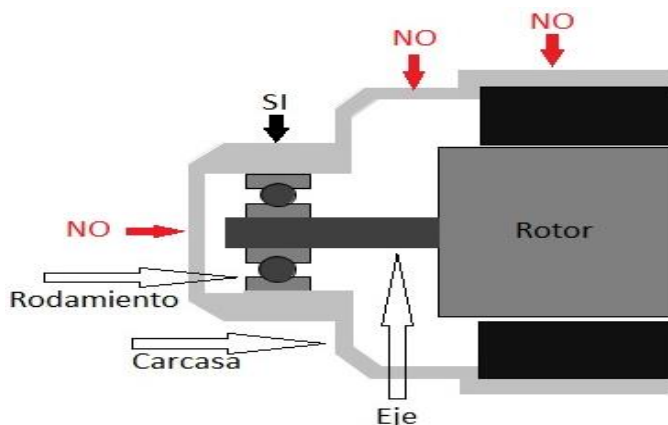
Las vibraciones en maquinaria rotativa son generadas por fuerzas cíclicas internas que no pueden ser medidas directamente, lo que se mide es la transmisión de esas fuerzas cíclicas a través de la estructura de la máquina, por lo tanto, el sensor de vibraciones mide la respuesta de la impedancia mecánica de la máquina a dichas fuerzas.

Se les llama puntos de medición a los lugares de la maquina donde se va a colocar el sensor para medir las vibraciones, en una o más orientaciones o direcciones,

De estos puntos depende la información que necesitamos, para tener conocimiento de los parámetros de estados reales en ese momento, o sea, que si hacemos una elección incorrecta de los puntos de medición en el momento de colocar los instrumentos que vamos a utilizar, la información que vamos a recibir será errónea, por lo que no podremos dar u diagnóstico preciso del equipo.

Por eso para evitar una incorrecta elección de los puntos de medición, nos apoyaremos en documentación y normas existentes, **Fuente:** Libro, (Azima DLI, 1990 -2010).

En general es deseable colocar el transductor de prueba lo más cerca posible del rodamiento, con metal sólido entre el rodamiento y el sensor. Se debe evitar la colocación en las gornas de rodamientos, ya que son hechas de metal delgado y conducen muy poco la energía de vibración. Si es posible habrá que seleccionar los lugares de ubicación de tal manera que no haya juntas entre metal y metal, entre el rodamiento y el sensor. La junta entre la campana y el cárter del estator de un motores un ejemplo de esto, ver **figura 2.3**.

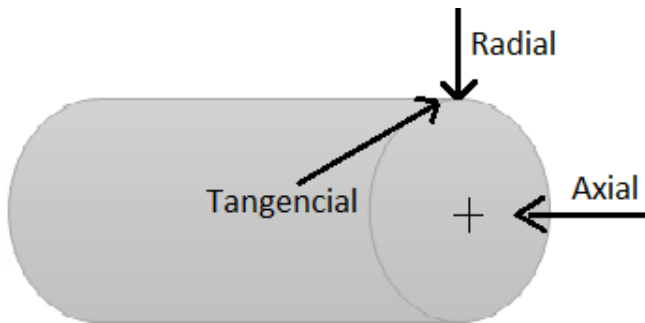


**Figura 2.3.** Colocación del instrumento de medición en el equipo.

En general se ha encontrado que para motores de menos de alrededor de 50 HP un punto de prueba es adecuado, pero para motores de más de 50 HP cada rodamiento debe de tener su propio punto de prueba, **Fuente:** Libro, (Azima DLI, 1990 -2010)

### **Mediciones Triaxiales.**

Para ayudar en la determinación de problemas de máquinas es muy útil obtener datos de vibración de cada punto de medición en tres direcciones. Esas direcciones se llaman, **Axial, Radial, y Tangencial**, ver figura 2.4, **Fuente:** Libro, (Azima DLI, 1990 -2010)



**Figura 2.4.** Mediciones triaxiales

#### 2.1.7.1 Localización física de los puntos de medición en la turbina de la Termoeléctrica.

Ya hemos visto con anterioridad lo importante que es la determinación correcta de los puntos de medición, y debido a eso vamos a hacer un poco más de énfasis en la ubicación exacta de dichos puntos, pero esta vez vamos a tenerlos en cuenta en un equipo más específico debido a su importancia del mismo en la empresa, como es el caso de la **turbina** en la termoeléctrica “Carlos Manuel de Céspedes”.

- **Las vibraciones verticales:** se toman sobre las tapas de los pedestales o carcasas a lo largo del eje de simetría vertical. En las anillas de excitación a través de las escobillas de carbón más cercanas al plano vertical central longitudinal sustituyendo el resorte de las escobillas por la presión de la punta del sensor.
- **Las vibraciones horizontales:** se toman en el flanco derecho del equipo mirándolo en el sentido del flujo de energía (de turbina a generador), en la parte inferior de los cojinetes en la mayor proximidad del plano horizontal central. En las anillas de excitación en la misma forma que para la medición vertical pero sobre las escobillas más próximas al plano horizontal central.
- **Las vibraciones axiales:** generales no pueden ser tomadas del modo que el punto de medición yazga en el plano de medición. Se elige entonces un punto perteneciente a una superficie paralela al plano de medición lo más

próximo posible al mismo. Si esta superficie es muy lejana o no es posible por falta de espacio para el transductor, se puede aplicar el cuerpo del transductor a una superficie axial en el lugar por el que pasa el plano de medición de modo que el eje de sensibilidad del transductor quede en dirección axial. En las anillas de excitación se omite la medición axial

#### **2.1.7.2 Factores que influyen en el estado de las vibraciones en la turbina.**

Luego de tener conocimiento sobre la localización física de los puntos de medición en la turbina, continuación haremos mención de los diferentes factores que influyen en el estado de las vibraciones de la turbina, factores que solo son específicos de este equipo dinámico.

- **Temperatura del aceite de lubricación.** La temperatura del aceite que llega a los cojinetes debe de estar del intervalo que recomienda el fabricante y su variación durante las mediciones no debe ser mayor de 5 o 6 grados C: Los cambios de viscosidad con la temperatura influyen en las vibraciones.
- **Temperatura de los cojinetes.** Debe estar en los valores normales o al menos históricos del equipo. No debe haber diferencia por causas desconocidas entre dos o más cojinetes que deban funcionar al mismo nivel de temperatura. Su variación durante las mediciones tampoco debe exceder los 5 o 6 grados C. El calentamiento anormal de un cojinete, además de indicar un defecto, calienta también el pedestal o carcaza pudiendo provocar desalineamiento del equipo y cambio de las vibraciones.
- **Velocidad de rotación.** Las vibraciones pueden variar sensiblemente con la velocidad de rotación sobre todo en las cercanías de algún estado de resonancia (por ej. velocidades críticas del roto, frecuencia propia de alguna otra parte del equipo, etc.) debido a que con la velocidad varia la frecuencia de las fuerzas excitadoras sincrónicas. Su tolerancia debe ser de más menos de 10 a 20 RPM según el equipo esté más cerca o lejos de algún estado de resonancia. Como los tacómetros industriales

comúnmente no tienen esta precisión ni apreciación, se hace necesario instalar para las mediciones un tacómetro o frecuencímetro de precisión o en su defecto controlar periódicamente la diferencia de velocidad estroboscópicamente con el equipo de medición.

- **Temperatura del escape.** En la marcha en vacío la temperatura de la tubuladura de escape tiene tendencia ascendente debido a las pérdidas. Si la turbina no está dotada con un sistema interno de enfriamiento que permita controlarla hay que realizar las mediciones en el menor tiempo posible y observar los efectos que la variación de la temperatura puede causar en las vibraciones, para en caso de dudas interrumpir las mediciones y reanudarlas cuando se haya normalizado la temperatura. Aquí es difícil establecer tolerancias porque los efectos dependen de la resolución constructiva de cada tipo de turbina. El calentamiento provoca dilataciones que pueden desalinear la máquina. Como índice debemos evitar variaciones mayores de 15 grados durante las mediciones, a reserva de casos en que deberá ser menor.
- **Parámetros de admisión.** La inestabilidad en la presión y temperatura del vapor de admisión tiene influencia en la estabilidad térmica de la máquina y en la estabilidad de su velocidad de rotación. Deben evitarse variaciones mayores de más menos 5 grados C y más menos 2 atm.
- **Uniformidad en el calentamiento de los cilindros.** Las diferencias anormales de temperatura en el cuerpo del cilindro ya sean provocadas por un régimen incorrecto de puesta en marcha o por deficiencias del sistema de drenajes provocan deformaciones que conducen a roces de los sellos de vapor deflectores con el rotor y en algunos casos pueden variar el alineamiento. La presencia de condensado en las partes de flujo produce impacto en los álabes. Además del aumento de las vibraciones este estado puede conducir a una avería seria. Debe vigilarse que las temperaturas del metal no sobrepasen las diferencias permisibles establecidas en las normas de operación, que suelen ser de 40 a 50 grados C entre las partes superiores e inferiores del cuerpo del cilindro.

- **Roces en sellos y deflectores por defectos mecánicos.** Debe auscultarse la maquina antes y se es necesario durante la realización de las mediciones para excluir la posibilidad de errores por vibraciones debidos a roces.
- **Vacío y nivel del condensado en el condensador.** La presión en el condensador y el nivel del condensado deben tener valores normales y contantes durante las mediciones. Una variación mayor de 25 mm Hg y de 200 mm del nivel del condensado pueden en algunas turbinas variar el alineamiento e introducir cambio en las vibraciones.
- **Temperatura del rotor del generador.** Por ser un cuerpo muy largo y de diámetro considerable, las variaciones de temperaturas asimétricas del rotor del generador provocan valores relativamente grandes de flexión en el mismo, lo que unido a su gran masa provoca un desbalance fuerte. Y sea por inestabilidad térmica del metal, o por diferencias en la disipación de calor a lo largo de su cuerpo (por suciedad en los canales de enfriamiento o por cortocircuito entre espiras del enrollado de excitación), el rotor del generador es propenso a flexiones térmicas y deben ser vigilados. En caso de dudas, se debe tratar de mantener estable la temperatura regulando el enfriamiento del generador.

### **2.1.8 Periodicidad establecida en los diferentes equipos para sus mediciones e inspección de las vibraciones**

Hay un punto vital a tener en cuenta en los equipos, es la sistematicidad con la que se ejecutan las mediciones e inspecciones, ya que de ello depende en gran medida varios aspectos fundamentales a tener en cuenta, como los siguientes: salud y seguridad del operario; fiabilidad y vida útil del equipo; eficiencia y rendimiento; aseguramiento de la estabilidad productiva de la empresa, entre otros. Pero para poder aplicar esta sistematicidad, hay que tener en cuenta varios criterios selectivos, los cuales nos van a dar tres clasificaciones en los equipos (**A, B, C**), para así saber a qué categoría pertenecen cada una de ellos, y de esa forma sabremos con que periodicidad podremos ejecutar las inspecciones y mediciones en dichos equipos. Aparte de las recomendaciones del fabricante, también nos apoyaremos en la **tabla**

**2.1 del epígrafe 2.1.3**, en ella están presentes y de manera explicada los criterios necesarios que podremos utilizar para la clasificación de los equipos.

### **2.1.9 Análisis de los resultados de la medición de las vibraciones en los equipos. Interpretación espectral.**

Una vez determinados los equipos a los cuales se les realizaran el monitoreo de las vibraciones siempre atendiendo a su importancia productiva y conociendo que una falla o avería a uno de ellos provocaría grandes limitaciones o la parada de una unidad de la termoeléctrica, además de conocidas todas las causas que pueden provocar el mal funcionamiento de dichos equipos, y que, siguiendo los pasos antes mencionados ya se determinaron los puntos de medición, los patrones de referencia y la periodicidad con que se debe realizar la medición, el próximo paso es el análisis de los resultados a partir de los datos obtenidos en la medición de las vibraciones.

Para la toma de datos se utilizara un modelo de medición de vibraciones en el que se reflejará, tal y como se muestra en la Tabla (2.4) los valores que se irán anotando a partir de las mediciones realizadas por el cada equipo o sistema.

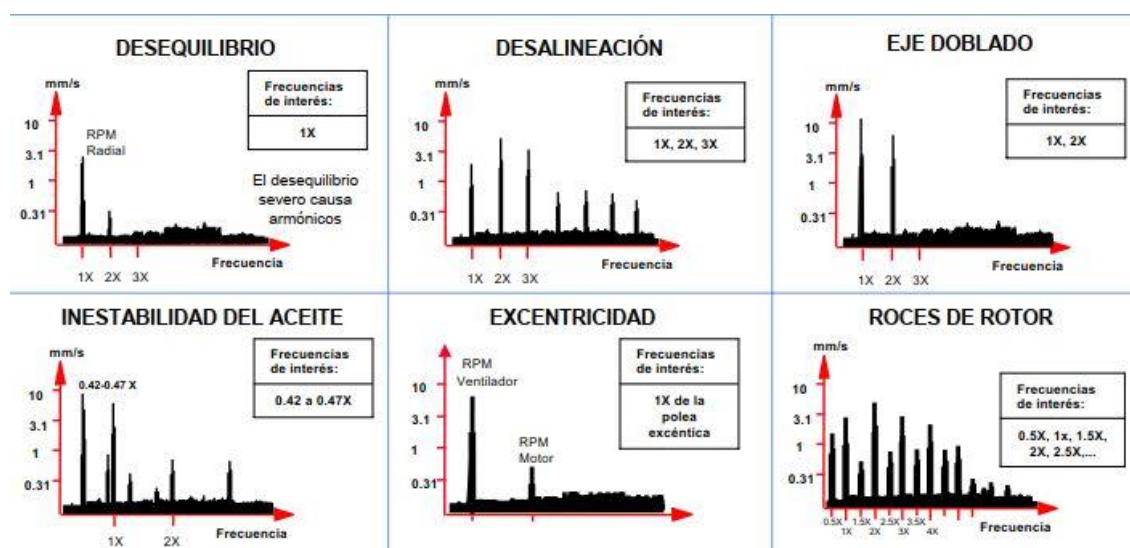
**Tabla (2.4)** Modelo para mediciones periódicas de vibraciones a los equipos rotatorios de la Central Termoeléctrica “Carlos Manuel de Céspedes”. **Fuente:** Elaboración propia.

| Mediciones Periódicas Unidad No.( ) CTE CMC |                           |                |       |           |      |
|---------------------------------------------|---------------------------|----------------|-------|-----------|------|
| Equipo:                                     | Nombre del equipo         | Fecha:         | Fecha | Hora:     | Hora |
| Puntos de Medición                          | Posiciones de la Medición |                |       |           |      |
|                                             | Vertical (Y)              | Horizontal (X) |       | Axial (Z) |      |
| Pto. 1                                      | Valor                     | Valor          |       | Valor     |      |
| Pto. 2                                      | Valor                     | Valor          |       | Valor     |      |
| Pto. 3                                      | Valor                     | Valor          |       | Valor     |      |
| Pto. 4                                      | Valor                     | Valor          |       | Valor     |      |
| Pto. 5                                      | Valor                     | Valor          |       | Valor     |      |

Estos datos o valores se compararán con los valores de los patrones de referencias que servirán para decidir si el/los equipo/s están en parámetros de vibraciones óptimos o no.

Posterior a dicha verificación de los datos tomados de las mediciones realizadas en la planta, se efectúa el análisis espectral, el cual se realiza a dicho equipo, a partir de los espectros de frecuencias que nos muestra el instrumento de medición utilizado para saber a partir del espectro representado cual puede ser el defecto o no que pueda tener. Para la realización de dicha interpretación es necesario conocer para cada defecto el armónico de frecuencia de los espectros que lo representa, lo cual se puede apreciar de manera resumida en las **tablas (A.7.1, A.7.2 y A.7.3)** del **anexo A.7.**

A continuación se muestra en la **figura (2.5)** los principales defectos, los principales armónicos que intervienen y por los cuales se ven representados, para lograr una buena interpretación espectral.



**Figura (2.5)** Principales defectos asociados a la interpretación espectral.

**Fuente:** Tabla (Brüel & Kjær, 2001)

Luego de este proceso, si el equipo tiene alguna alteración en los parámetros y de encontrarse a partir del análisis realizado el posible defecto, se efectuará la corrección para evitar una futura avería.

## **2.2 Conclusiones parciales del capítulo II.**

Luego de realizar una investigación detallada mediante documentación, normas y artículos relacionados con todo lo referente a los equipos roto-dinámicos, se logró:

- Trazar una metodología para poder aplicar en el mantenimiento proactivo, mediante el diagnostico en los equipos rotatorios de la Central Termoeléctrica “Carlos Manuel de Céspedes”.
- Se tuvieron en cuenta la implementación de varios aspectos importantes para poder llevar a cabo el diseño de la metodología.
- La categorización de los diferentes equipos rotatorios de la central.
- Un análisis detallado de los registros estadísticos de mantenimientos en la Termoeléctrica.
- La aplicación del método de Pareto.
- Se llevó a cabo el análisis causa-efecto o técnica de espina de pescado de Ishikawa.
- Selección de la instrumentación a utilizar, así como los parámetros de estado a controlar.
- Análisis de los resultados de la medición de las vibraciones en los equipos. Interpretación espectral.

## **CAPÍTULO III. APLICACIÓN PRÁCTICA DE LA METODOLOGÍA PARA LA APLICACIÓN DEL MANTENIMIENTO PRO-ACTIVO UTILIZANDO EL MÉTODO DE ANÁLISIS DE VIBRACIONES A LOS EQUIPOS ROTATORIOS FUNDAMENTALES DE LA CENTRAL TERMOELÉCTRICA DE “CARLOS MANUEL DE CÉSPEDES”.**

En este capítulo se llevará a cabo la aplicación práctica de la metodología realizada para la aplicación del mantenimiento Pro - activo utilizando el análisis de vibraciones como base fundamental, en los equipos rotatorios de la Central Termoeléctrica “Carlos Manuel de Céspedes”, seleccionando siempre aquellos que según su importancia y nivel de utilización, sea necesario aplicarle este tipo de método o técnica para asegurar su correcto funcionamiento para el proceso productivo dentro de la central.

### **3.1. Paso 1. Diagnóstico del sistema organizativo actual del mantenimiento en la Central Termoeléctrica “Carlos Manuel de Céspedes”.**

Para poder adentrarnos en la clasificación de los equipos rotatorios y realizar el análisis de las vibraciones, técnica fundamental de la aplicación práctica de esta metodología, lo primero que debemos conocer es como está actualmente organizado el sistema de mantenimiento de la Central Termoeléctrica “Carlos Manuel de Céspedes” para así poder identificar los problemas y proponer una serie de soluciones que sean adecuadas.

Por lo antes mencionado, es necesario conocer las características del mantenimiento en la CTE, las cuales se abordan en el siguiente epígrafe.

### **3.1.1. Caracterización del mantenimiento en la Central Termoeléctrica "Carlos Manuel de Céspedes".**

Se puede resumir como resultados de la primera etapa de la metodología expuesta en el capítulo 2, a partir del Diagnóstico del mantenimiento, que el mantenimiento en la empresa está centrado por el grupo de Inspección y Planificación de Mantenimiento, los cuales cuentan con el apoyo de un grupo de Diagnóstico que pertenecen a la dirección técnica. Tienen como función fundamental organizar todas las actividades referentes al mantenimiento con el objetivo de lograr el máximo aprovechamiento, disponibilidad y eficiencia de los equipos. Para el logro de esta función cuentan con un grupo de talleres de mantenimiento los cuales están compuestos por: Taller Mantenimiento Mecánico, Taller Mantenimiento Eléctrico, Taller Mantenimiento Automático y Taller de Maquinado. La base fundamental actual con la que cuentan para trabajar el grupo de planificación y los talleres de mantenimiento de la Central termoeléctrica "Carlos Manuel de Céspedes" es un Sistema Flexible o Alterno de Mantenimiento (SAM). Dicho sistema se basa en sistema organizativo combinado de tres tipos de mantenimiento: Mantenimiento Preventivo Planificado (MPP), Mantenimiento Correctivo y el Mantenimiento en Base a la Condición (MBC), aplicando además, las recomendaciones del fabricante y normas ramales del MINBAS. Actualmente se está implementando un nuevo tipo de mantenimiento, el Proactivo, que lo está llevando a cabo el grupo de diagnóstico.

### **3.1.2. Situación técnica - organizativa del mantenimiento en la Central Termoeléctrica "Carlos Manuel de Céspedes", antes de la aplicación de las nuevas técnicas para el diagnóstico del estado de los dispositivos.**

Antes de la formación del grupo de diagnóstico en 1993 (Chaviano Bernal, 2004), el sistema de mantenimiento de la empresa se basaba fundamentalmente en el MPP según recomendaciones del fabricante, con la guía y aplicación del Sistema Organizativo de Mantenimiento a Centrales Eléctricas (SOMCE), según normativas de la Unión Nacional Eléctrica (UNE), que posteriormente fue ganando en organización y mejoras técnicas, en la medida que se fue adquiriendo experiencias

de trabajo por parte de las áreas de planificación y los mantenedores, presentando en todos los casos los siguientes inconvenientes entre otros:

- El número de averías no se logra reducir, por cuanto el mantenimiento planificado en ocasiones no era oportuno ya que las fallas podían ocurrir en un tiempo antes de este, o posterior al mismo.
- Los gastos inadecuados de materiales, por cuanto se desarman equipos y cambian piezas que aún no han rendido el máximo de su vida útil.
- La mano de obra se encarece por la necesidad de realizar un alto volumen de mantenimiento en las fechas planificadas sea o no necesaria dicha reparación.
- No existen un seguimiento de parámetros rigurosamente controlados para definir la calidad del mantenimiento.

Para diagnosticar el estado del Sistema de Mantenimiento de la empresa y trabajar sobre la base del Mantenimiento Proactivo se creó un equipo de trabajo, el cual estuvo integrado por:

- Técnico Principal del Grupo de Diagnóstico.
- Grupos de trabajo de Diagnostico por Talleres de Mantenimiento
- Apoyo de la Universidad de Cienfuegos.

#### **Problemas fundamentales que se detectaron y se han ido solucionando.**

1. Problemas de organización, fundamentalmente en lo que se refiere a la planificación y preparación de los trabajos, específicamente los referidos a coordinación de la planificación con cada una de las áreas del mantenimiento.
2. Carencias notables de infraestructura soporte para la ejecución de mantenimiento a saber: Falta de documentación técnica u obsolescencia de la misma, inexistencia de listado de equipos y componentes o listados insuficientes, falta de información y datos técnicos.
3. Defectos importantes en la gestión de repuestos, falta de estandarización y problemas de inventario.

4. Defectos en el control y seguimiento de los trabajos de mantenimiento: Pérdidas de trazabilidad de las órdenes, mala documentación de los trabajos hechos, no existían nomenclatura única para la definición de las averías.
5. Carencia de información y resultados de mantenimiento, con la imposibilidad consiguiente de poder aplicar políticas de mejora, eliminación de actividades innecesarias tras su análisis, solución de fallas sistemáticas y repetitivas, etc.
6. Poca utilización de herramientas informáticas de gestión con las que se puede obtener un procesado rápido y eficaz de la información del mantenimiento.

**También se identificaron como puntos fuertes:**

1. Profesionalidad y espíritu de sacrificio.
2. Buen conocimiento de los equipos y de su mantenimiento.

**3.2. Paso 2. Clasificación de los equipos o sistemas atendiendo a la importancia de los mismos en el sistema productivo de la central.**

Siguiendo los pasos de la metodología diseñada para la aplicación del mantenimiento proactivo utilizando el método del análisis de las vibraciones, el segundo paso a tener en cuenta es la de la clasificación de los equipos o sistemas rotatorios de la Central Termoeléctrica “Carlos Manuel Céspedes”.

Teniendo en cuenta la guía metodológica descrita por Leiva Castro (1996) aplicada para la clasificación de equipos y seleccionar el tipo de mantenimiento a aplicar, que se muestra en la **tabla 2.1** del capítulo anterior, se categorizaron en **A, B, C**, según el grado de complejidad e importancia, los principales sistemas y equipos rotatorios de la central termoeléctrica, los cuales, después de una ardua tormenta de ideas llevada a cabo por un grupo de expertos, quedaron clasificados siguiendo los 11 aspectos evaluados (selectivos, directivos y generales), indicados en dicha metodología, los cuales se muestran en la **tabla 3.1**, que se da a conocer a continuación.

**Tabla 3.1.** Clasificación de los principales sistemas y equipos rotatorios de la Central Termoeléctrica “Carlos Manuel de Céspedes”. **Fuente:** Elaboración propia.

| Equipos por sistemas del proceso productivo       | Tipos de Clasificación | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | Total de puntos | Clasificación final del Equipo |
|---------------------------------------------------|------------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|-----------------|--------------------------------|
| Turbina                                           | A                      | x | x | x | x | x | x | x | x | x | X  | x  | 11              | A                              |
|                                                   | B                      |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |                 |                                |
|                                                   | C                      |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |                 |                                |
| Sistema Bombas de Agua de Alimentar               | A                      |   |   | x | x | x | x |   | x |   |    |    | 5               | B                              |
|                                                   | B                      | x | x |   |   |   |   | x |   | x | X  | x  | 6               |                                |
|                                                   | C                      |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |                 |                                |
| Sistema de Ventiladores de tiro forzado           | A                      |   |   | x | x | x |   |   |   | x |    |    | 4               | B                              |
|                                                   | B                      | x | x |   |   |   | x | x | x |   | X  | x  | 7               |                                |
|                                                   | C                      |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |                 |                                |
| Ventiladores Recirculadores de gases              | A                      | x |   |   | x |   |   |   |   |   |    |    | 2               | B                              |
|                                                   | B                      |   | x | x |   | x | x | x | x | x | X  | x  | 9               |                                |
|                                                   | C                      |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |                 |                                |
| Calentador de aire regenerativo                   | A                      | x |   | x | x |   |   |   |   | x |    |    | 4               | B                              |
|                                                   | B                      |   | x |   |   |   | x | x | x |   | X  | x  | 6               |                                |
|                                                   | C                      |   |   |   |   | x |   |   |   |   |    |    | 1               |                                |
| Sistema Bombas de circulación                     | A                      |   |   | x | x | x |   |   |   |   |    |    | 3               | B                              |
|                                                   | B                      | x | x |   |   |   | x | x | x | x | X  | x  | 8               |                                |
|                                                   | C                      |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |                 |                                |
| Sistema Bombas de condensado                      | A                      |   |   | x | x |   |   |   |   |   |    |    | 2               | B                              |
|                                                   | B                      | x | x |   |   | x | x | x | x | x | X  | x  | 9               |                                |
|                                                   | C                      |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |                 |                                |
| Sistema Bombas de enfriamiento                    | A                      |   |   | x | x |   |   |   |   |   |    |    | 2               | B                              |
|                                                   | B                      | x | x |   |   | x | x | x |   |   | X  | x  | 7               |                                |
|                                                   | C                      |   |   |   |   |   |   |   | x | x |    |    | 2               |                                |
| Bomba de Drenaje                                  | A                      | x |   | x | x |   |   |   |   |   |    |    | 3               | B                              |
|                                                   | B                      |   |   |   |   |   | x | x | x | x | X  | x  | 6               |                                |
|                                                   | C                      |   | x |   |   | x |   |   |   |   |    |    | 2               |                                |
| Sistema Bombas de petróleo                        | A                      |   |   | x | x |   |   |   |   |   |    |    | 2               | B                              |
|                                                   | B                      | x | x |   |   |   | x | x | x | x | X  | x  | 8               |                                |
|                                                   | C                      |   |   |   |   | x |   |   |   |   |    |    | 1               |                                |
| Sistema Bombas de Gas - oíl                       | A                      |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |                 | C                              |
|                                                   | B                      |   |   |   |   |   | x |   |   | x | X  |    | 3               |                                |
|                                                   | C                      | x | x | x | x | x |   | x | x |   |    | x  | 8               |                                |
| Sistema Ventilador enfriamiento detector de llama | A                      |   |   |   | x |   |   |   |   |   |    |    | 1               | C                              |
|                                                   | B                      | x |   | x |   |   |   | x |   |   |    | x  | 4               |                                |
|                                                   | C                      |   | x |   |   | x | x |   | x | x | X  |    | 6               |                                |
| Bomba de transferencia de condensado              | A                      | x |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    | 1               | C                              |
|                                                   | B                      |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |                 |                                |
|                                                   | C                      |   | x | x | x | x | x | x | x | x | X  | x  | 10              |                                |
| Bomba principal de aceite                         | A                      |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |                 | C                              |
|                                                   | B                      |   |   |   |   | x | x | x | x |   |    |    | 4               |                                |
|                                                   | C                      | x | x | x | x |   |   |   |   | x | X  | x  | 7               |                                |
| Sistema Bombas de transferencia de aceite         | A                      |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |                 | C                              |
|                                                   | B                      |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |                 |                                |
|                                                   | C                      | x | x | x | x | x | x | x | x | x | X  | x  | 11              |                                |

**Tabla 3.1.** Clasificación de los principales sistemas y equipos rotatorios de la Central Termoeléctrica “Carlos Manuel de Céspedes”. **Fuente:** Elaboración propia. (Continuación).

| Equipos por sistemas del proceso productivo              | Tipos de Clasificación | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | Total de puntos | Clasificación final del Equipo |
|----------------------------------------------------------|------------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|-----------------|--------------------------------|
| Bomba de circulación de aceite                           | A                      | x | x | x | x |   |   |   |   |   |    |    | 4               | C                              |
|                                                          | B                      |   |   |   |   |   |   | x |   |   |    |    | 1               |                                |
|                                                          | C                      |   |   |   |   | x | x |   | x | x | X  | x  | 6               |                                |
| Ventilador extracción gases tanque principal             | A                      | x |   | x | x |   |   |   |   |   |    |    | 3               | C                              |
|                                                          | B                      |   |   |   |   |   |   | x |   |   |    |    | 1               |                                |
|                                                          | C                      |   | x |   |   | x | x |   | x | x | X  | x  | 7               |                                |
| Sistema Bombas contraincendios                           | A                      |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |                 | C                              |
|                                                          | B                      | x |   |   |   |   | x | x |   | x |    |    | 4               |                                |
|                                                          | C                      |   | x | x | x | x |   |   | x |   | X  | x  | 7               |                                |
| Sistema Bombas agua descarbonatada (Tratamiento químico) | A                      |   |   |   | x |   |   |   |   |   |    |    | 1               | C                              |
|                                                          | B                      | x |   |   |   |   | x | x |   | x |    |    | 4               |                                |
|                                                          | C                      |   | x | x |   | x |   |   | x |   | X  | x  | 6               |                                |
| Sistema Bombas agua desmineralizada(Tratamiento químico) | A                      |   |   |   | x |   |   |   |   |   |    |    | 1               | C                              |
|                                                          | B                      | x |   |   |   |   | x | x |   | x |    |    | 4               |                                |
|                                                          | C                      |   | x | x |   | x |   |   | x |   | X  | x  | 6               |                                |

Una vez clasificados los sistemas y equipos rotatorios siguiendo lo descrito en la **tabla 2.1** del capítulo anterior, y analizados por un determinado grupo de expertos, se determinó que se les efectuará el mantenimiento Proactivo a todos los categorizados en “A y B”, debido a que, según los aspectos selectivos evaluados, una avería en ellos puede ocasionar la parada o limitación de la planta, lo cual significaría una gran pérdida de MW que se dejarían de producir y a su vez grandes pérdidas para el país.

### 3.3. Paso 3. Determinación de los equipos a evaluar según la cantidad de fallas presentadas mediante la aplicación de la técnica de Pareto.

Después de clasificados y definidos ya, quienes son los equipos o sistemas a los cuales se le efectuará el mantenimiento Proactivo, el próximo paso siguiendo la metodología diseñada en el capítulo anterior es la determinación de cual o cuales son los equipos a los que se evaluarán atendiendo la cantidad de fallas que han presentado. Para esto, se tomó como período de análisis desde el 2010 hasta el

2022, donde, a partir de las bases de datos de explotación, se buscaron todos los equipos o sistemas que ocasionaron pérdidas por energía indisponible debido a fallas inesperadas durante ese período (**anexo A.9**).

Tal y como se muestra en la **tabla 3.2** que se puede apreciar a continuación, quedó plasmado, en un modelo resumen, todas las averías por equipos que produjeron pérdidas por energía indisponible durante el período señalado. Para este modelo se tomaron los equipos fundamentales clasificados anteriormente y que presentaron fallas en ese período, los cuales son: el Calentador de Aire Regenerativo (CAR), los Ventiladores de Tiro Forzado (VTF), las Bombas de Agua de Alimentar (BAA), las turbinas, las Bombas de Condensado (B. Cond.), las Bombas de Circulación (B. Circ.), los Ventiladores Recirculadores de Aire (VRG) y las Bombas de Petróleo (B. Petróleo).

**Tabla 3.2.** Modelo de la cantidad de averías por sistemas o equipos rotatorios a evaluar. **Fuente:** Elaboración propia.

| Equipos o sistemas | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 | Total de averías |
|--------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------------------|
| CAR                | 20   | 11   | 6    | 3    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 40               |
| VTF                | 13   | 8    | 13   | 8    | 2    | 4    | 16   | 11   | 0    | 3    | 4    | 0    | 3    | 85               |
| BAA                | 8    | 24   | 3    | 13   | 10   | 2    | 0    | 0    | 5    | 2    | 3    | 2    | 35   | 107              |
| B.Cond             | 2    | 2    | 2    | 1    | 1    | 0    | 0    | 0    | 0    | 7    | 1    | 0    | 22   | 38               |
| B.Circ             | 0    | 0    | 2    | 4    | 0    | 0    | 5    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 7    | 18               |
| Turbina            | 0    | 0    | 0    | 0    | 12   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 12               |
| B.petróleo         | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 2    | 1    | 0    | 1    | 2    | 2    | 8                |
| VRG                | 0    | 1    | 0    | 1    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 2                |

Luego de conocido el total de averías por equipos en el período utilizado para el trabajo se debe realizar el análisis de la técnica de Pareto. Para ello se tomará como base las averías que aparecen reflejadas en la **tabla 3.2** mostrada anteriormente.

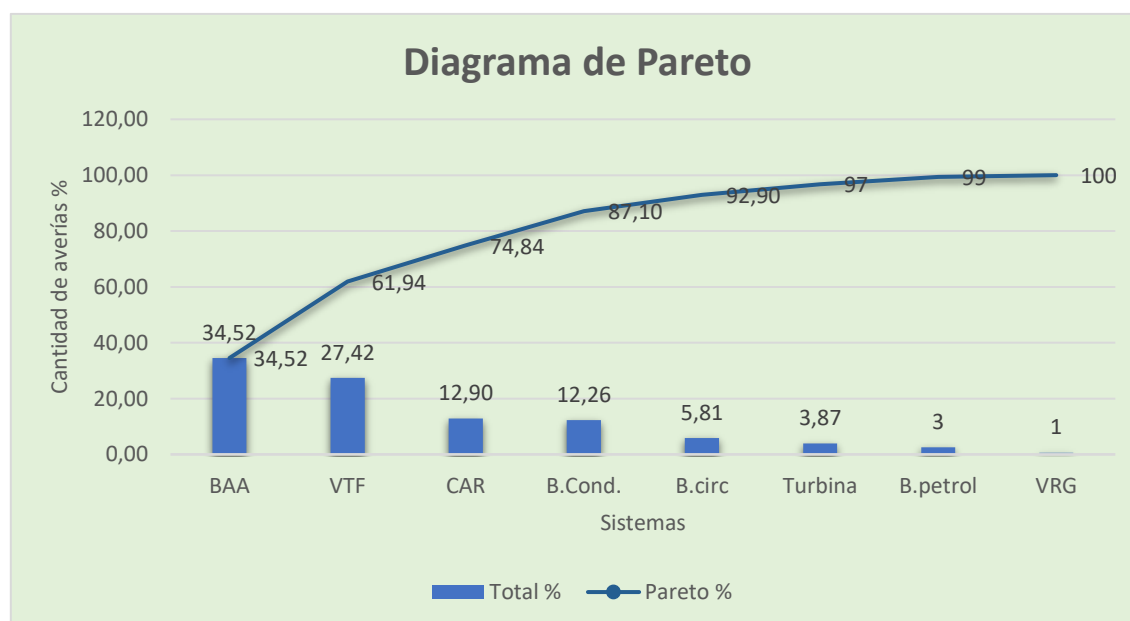
Primeramente es necesario organizar los equipos por la cantidad de averías de mayor a menor, y también el porcentaje que representan las averías de cada sistema

con el total de averías, para así poder obtener la frecuencia acumulada en por ciento. Los resultados de esto se resumen en un modelo que se muestra en la **tabla 3.3** que aparece a continuación.

**Tabla 3.3.** Modelo para la aplicación de la técnica de Pareto. **Fuente:** Elaboración propia.

| Sistemas    | Total de Averías | Total % | Pareto % |
|-------------|------------------|---------|----------|
| BAA         | 107              | 34,52   | 34,52    |
| VTF         | 85               | 27,42   | 61,94    |
| CAR         | 40               | 12,90   | 74,84    |
| B.Cond.     | 38               | 12,26   | 87,10    |
| B.Circ.     | 18               | 5,81    | 92,90    |
| Turbina     | 12               | 3,87    | 97       |
| B.petróleo. | 8                | 3       | 99       |
| VRG         | 2                | 1       | 100      |

A partir de lo descrito anteriormente se procede a la aplicación del Pareto que se muestra a continuación en la **figura 3.1**.



**Figura 3.1.** Diagrama de Pareto para la determinación de los equipos a evaluar según la cantidad de averías. **Fuente:** Elaboración propia.

En el gráfico que aparece en la **figura 3.1** mostrada anteriormente, se presentan los resultados de la aplicación de la técnica de Pareto; la cual muestra que los equipos o sistemas que mayores problemas han presentado y que generan mayores pérdidas energéticas para la planta son: las Bombas de Agua de Alimentar y los Ventiladores de Tiro Forzado.

### **3.4. Paso 4. Métodos y técnicas a aplicar para el análisis de las vibraciones en los equipos rotatorios para el Mantenimiento Proactivo.**

Luego de que se tienen ya clasificados, identificados y bien definidos cuales son los equipos que por la cantidad de averías que tienen en el período usado como referencia serán evaluados o analizados; el próximo paso a tener en cuenta según la metodología trazada en el capítulo anterior es la utilización de los métodos y las técnicas que nos van a servir de base para el desarrollo y análisis de las vibraciones en los equipos rotatorios como base fundamental para la introducción del mantenimiento Proactivo en la Central Termoeléctrica “Carlos Manuel de Céspedes” y que nos darán la información del estado y la tendencia de cada equipo.

Para la realización y desarrollo de este epígrafe, se utilizarán ejemplos prácticos de los sistemas de Bombas de Agua de Alimentar y Ventiladores de Tiro Forzado, que son los que, según el análisis de Pareto realizado en el paso anterior, los que más están generando pérdidas energéticas a la planta y con esto pérdidas económicas al país.

#### **3.4.1. Paso 4.1 Resultados de los mantenimientos. Análisis de las bases de datos.**

Una vez conocidos que los equipos o sistemas que mayores pérdidas generan según el análisis de Pareto realizado en el paso anterior son las Bombas de Agua de Alimentar y los Ventiladores de Tiro Forzado, se procede a realizar un análisis en la organización y desarrollo del mantenimiento de donde, se elabora un programa para obtener una síntesis de todos los resultados de las predicciones realizadas a partir de la búsqueda en bases de datos del historial de los equipos o sistemas, además de la realización de encuestas a operarios y mecánicos

calificados, entre otros, (ver **Anexo A.10**). A partir de esto, se pudieron encontrar que las fallas fundamentales del Ventilador de Tiro Forzado y las Bombas de Agua de Alimentar, las cuales se muestran a continuación:

- Excesivo juego axial en los coppling semirrígidos.
- Las tuberías de succión y descarga apoyadas sobre la bomba.
- Sistemas de amortiguamiento de tuberías defectuosas.
- Suciedad en la base de la bomba que no permite que trabaje aislada del piso de equipos auxiliares.
- Desalineamiento mecánico.
- Desgaste y holguras de chumaceras
- Exceso de apriete en los tornillos de anclaje de la bomba
- Defectos de montaje y mantenimiento
- Deficiencia en el agua de enfriamiento.
- Acumulación de sedimentos en los impelentes y desgaste.
- Desgaste de aros de sellaje e impelentes.
- Desbalance de masa.

Este paso es la base fundamental para garantizar un análisis efectivo de las vibraciones a los equipos rotatorios a través de la aplicación de la técnica causa - efecto que se realizará en el próximo epígrafe.

#### **3.4.2. Paso 4.2 Aplicación de la técnica causa - efecto.**

Luego de analizados todos los resultados de los mantenimientos y encontradas todas las fallas principales de los Ventiladores de Tiro Forzado y las Bombas de Agua de Alimentar, se puede aplicar ya la técnica Causa - Efecto, la cual se muestra desarrollada en el **anexo A.8**. En ella se muestra de manera profunda el estudio

realizado con el objetivo de buscar el origen, la causa - raíz que origina las fallas en los equipos analizados.

Durante el desarrollo del estudio para la aplicación de esta técnica, se tomó toda la información contenida en los archivos de explotación de la central termoeléctrica, así como análisis estadísticos del área de diagnóstico y de inspección, de donde, a partir del análisis de cada uno de las fallas planteadas se verifica, si las causas se corresponden con los posibles defectos. Aplicando en cada caso todas las técnicas, datos estadísticos y los resultados de los trabajos de mantenimiento para ir descartando cada uno de los erróneos.

A continuación, se presenta la **tabla 3.4** donde se sintetizan los resultados del método Causa-Raíz para todas las fallas que aparecen en el Diagrama Causa - Efecto del **anexo A.8**.

**Tabla 3.4.** Síntesis del Análisis Causa-Raíz (Causas Directas). **Fuente:** Elaboración propia.

| Tipo de Fallas                   | Síntomas                              | Causa Raíz                                                            |
|----------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| Sobrecalentamiento en Chumaceras | Altas vibraciones radiales y axiales. | Holguras y Descentramiento. Errores de mantenimiento y de explotación |
| Desbalance de Masa               | Altas vibraciones Radiales            | Tratamiento del agua deficiente. Corrosión y desgaste                 |
| Sobrecarga del motor             | Alto consumo                          | Defectos de montaje, roce mecánico y desalineamiento.                 |
| Rigidez en los Sistemas          | Vibraciones radiales                  | Sistemas de amortiguamiento y dilataciones defectuosas.               |

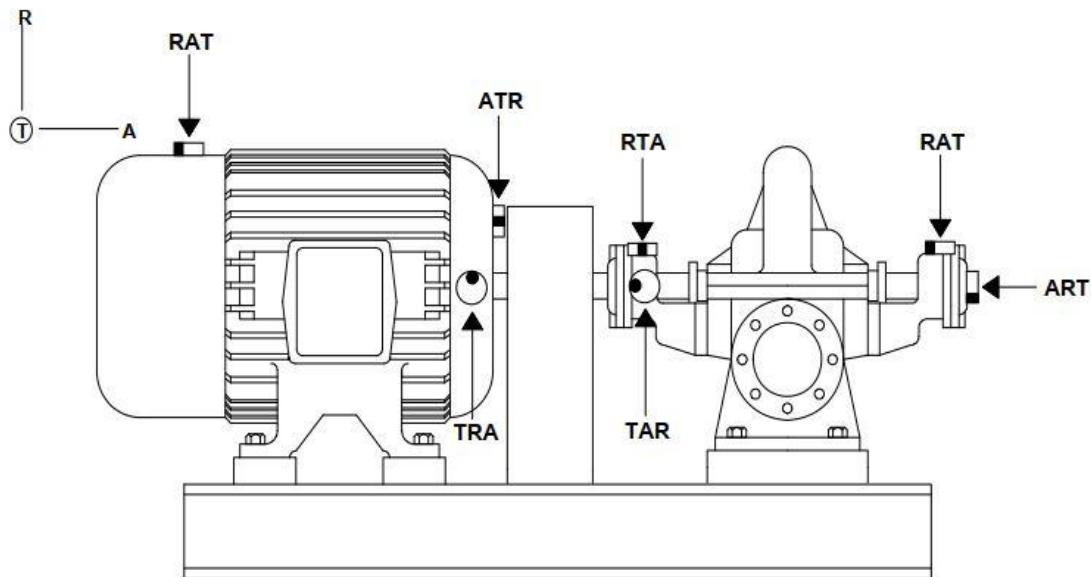
**Tabla 3.4.** Síntesis del Análisis Causa - Raíz (Causas Directas). **Fuente:** Elaboración propia. **(Continuación).**

| Tipo de Fallas                            | Síntomas                                   | Causa Raíz                                              |
|-------------------------------------------|--------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| <b>Sobrecalentamiento en Chumaceras</b>   | Alta temperatura en chumaceras             | <b>Deficiencia en el agua de enfriamiento</b>           |
| <b>Bajo flujo bombeado</b>                | Baja presión de descarga                   | <b>Desgaste en aros de sellaje</b>                      |
| <b>Problemas con agua de Enfriamiento</b> | Alta temperatura en chumaceras y cabezales | <b>Obstrucción en líneas de agua de enfriamiento</b>    |
| <b>Errores del Mantenimiento</b>          | Altas temperaturas en chumaceras           | <b>Defectos en juego axial y aprietes en chumaceras</b> |
|                                           | Vibraciones radiales                       | <b>Exceso de apriete en los tornillos de anclaje</b>    |
|                                           | Vibraciones radiales                       | <b>Flexión en ejes y excentricidad</b>                  |
|                                           | Vibraciones radiales y axiales             | <b>Desalineamiento mecánico</b>                         |

### 3.4.3. Paso 4.3 Determinación de los puntos de medición de las vibraciones en los equipos rotatorios, (Azima DLI, 1990 -2010)

Para la determinación de los puntos de medición se tuvo en cuenta las características principales de cada uno de los equipos rotatorios a evaluar, en específico se analizaron las 2 posiciones en la que pueden encontrar situados dichos equipos (**Horizontal** y **Vertical**) y se escogieron como zonas para colocar el

transductor de prueba lo más cerca posible del rodamiento (que son los puntos de apoyo del eje de rotación para determinar las variaciones de las vibraciones), con metal sólido entre el rodamiento y el sensor. Luego de determinar la zona donde colocar el transductor se toman los puntos de medición en cada zona en las 3 direcciones: radial (Vertical), tangencial (Horizontal) y Axial debido a que es muy útil para obtener la mayor cantidad de información de vibraciones y ayudar a determinar los problemas en las máquinas. Los puntos de medición quedaron ubicados gráficamente como aparece en las **figuras 3.2 y 3.3** que se muestran a continuación:

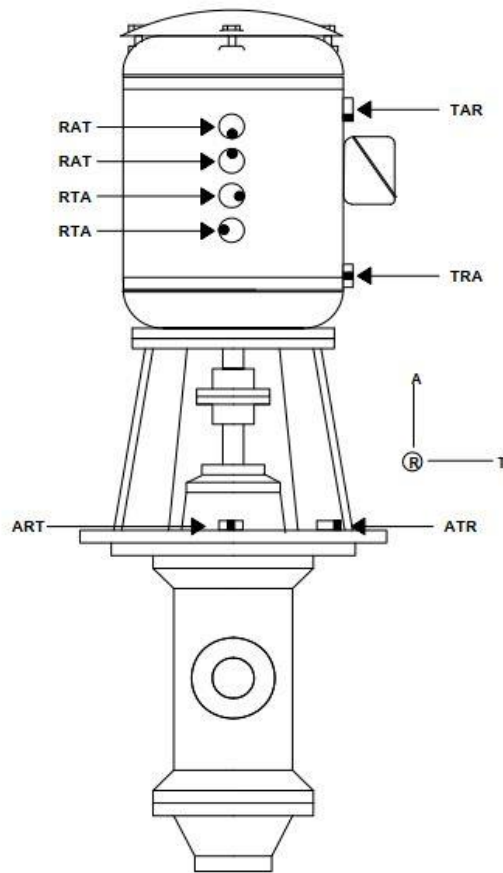


R - Radial.

T - Tangencial.

A - Axial.

**Figura 3.2.** Ubicación de los puntos de medición de los equipos rotatorios en posición horizontal. **Fuente:** (Azima DLI, 1990 -2010)



R - Radial.

T - Tangencial.

A – Axial.

**Figura 3.3.** Ubicación de los puntos de medición de los equipos rotatorios en posición horizontal.

**Fuente:** (Azima DLI, 1990 -2010)

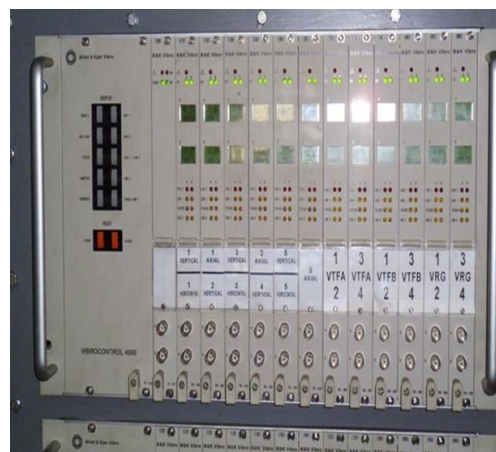
#### **3.4.4. Paso 4.4 Determinación de los instrumentos necesarios para el desarrollo del monitoreo de las vibraciones en los equipos rotatorios.**

Teniendo en cuenta los resultados investigativos desarrollados en el trabajo, así como las normativas de la Unión Eléctrica (UNE), se necesita para lograr un análisis efectivo de las vibraciones, un sistema de monitoreo continuo que permita la detección precoz de una posible falla y poder corregirla para evitar que suceda una avería; además de un personal calificado en la temática de las vibraciones y una instrumentación acorde a las exigencias y tecnologías desarrolladas en la actualidad.

Actualmente el grupo de diagnóstico cuenta con excelentes equipos que permiten realizar el mantenimiento Proactivo basado en el análisis de las vibraciones, los cuales se muestran a en la **figura 3.4 inciso a) y b)** que aparecen a continuación.



**a)** Analizador de vibraciones VIBXpert II



**b)** Equipo de monitoreo continuo en tiempo real VIBROCONTROL 4000

**Figura 3.4.** Instrumentos utilizados para el análisis de vibraciones del grupo de diagnóstico de la Central Termoeléctrica "Carlos Manuel de Céspedes". **Fuente:** Central Termoeléctrica "Carlos Manuel de Céspedes".

**El analizador de vibraciones VIBXpert II (ver figura 3.4 inciso a))** es un instrumento que permite la recopilación de datos basada en una ruta, el diagnóstico de vibraciones en valor global, visualizar espectros de vibración y, señales en el tiempo, pulsos de choque (estado de rodamientos y engranes), Para medidas de otros parámetros DC y AC, RPM, Angulo de fase, temperatura. Para realización de balances in situ. Para medición de orbitas de eje y chumacera. Para realizar características de velocidad. (Velocidad vs vibraciones).

**El Vibrocontrol 4000 (ver figura 3.4 inciso b))** es un instrumento de medición que permite el monitoreo continuo en tiempo real del parámetro de estado de Vibraciones a los equipos fundamentales de la planta, a través del uso del Programa VCM 400. Entre sus funciones principales tiene las mediciones dinámicas en tiempo real, mide vibración en valor global, realiza mediciones Absolutas y Relativas de eje, sirve para visualizar espectros de vibración, mediciones de rpm y expansiones relativas y absolutas de la turbina.

### 3.4.5. Paso 4.5 Establecer patrones de referencia.

El próximo paso a realizar según la metodología diseñada en el capítulo 2 es establecer los patrones de referencia, que no son más que los valores que nos va a permitir ver si los valores de vibraciones están en condiciones óptimas o no para su funcionamiento. Los patrones de referencia según la norma ISO -10816 representado en la **figura 2.2** del capítulo anterior, para las Bombas de Agua de Alimentar y los Ventiladores de Tiro Forzado (fueron determinados mediante la aplicación de la técnica de Pareto como los equipos que mayores problemas presentan) son los mostrados en la **tabla 3.5** que se puede apreciar a continuación:

**Tabla 3.5.** Severidad de las vibraciones para las Bombas de Agua de Alimentar y los Ventiladores de tiro Forzado de la Central Termoeléctrica “Carlos Manuel de Céspedes”. **Fuente:** Elaboración propia.

| Severidad de las vibraciones | Valores de referencia  |
|------------------------------|------------------------|
| Excelente                    | $V < 0.28$             |
| Normal                       | $0.28 \leq V < 2.8$    |
| Admisible                    | $2.8 \leq V < 7.10$    |
| Límite                       | $7.10 \leq V < 18.00$  |
| No permisible                | $18.00 \leq V < 45.00$ |

### 3.4.6. Paso 4.6 Establecer la frecuencia de medición para cada equipo rotatorio.

Para establecer la frecuencia con la que se debe realizar la medición a cada equipo se tuvo en cuenta la clasificación de los equipos que aparece en el **epígrafe 3.2** del presente capítulo, basándose principalmente en la importancia productiva y la criticidad de los equipos.

Por ello, quedaron establecidos, tal y como aparece en la **tabla 3.6** que se muestra a continuación que a los Calentadores de Aire Regenerativos, las Bombas de Petróleo, los Ventiladores Recirculadores de Gases, las Bombas de Circulación y las Bombas de Condensado realizarles las mediciones con una frecuencia mensual, mientras que a las Bombas de Agua de Alimentar debe realizárseles las mediciones con una frecuencia quincenal debido a que una avería de ellos puede ocasionar la limitación al 50 % de una unidad y hasta ocasionar la parada de la unidad en algunos casos. Ahora, el caso de la turbina, que es una máquina crítica que el nivel de importancia productiva que tiene es que imprescindible para la generación de MW y que tiene una complejidad alta se le debe realizar las mediciones con una frecuencia semanal ya que una avería en ella significaría el paro total de la unidad dejándose de producir 158 MW por cada hora que este equipo este en reparación. Y por último las bombas de enfriamiento deben hacérseles con una frecuencia de cada 2 meses.

**Tabla 3.6.** Modelo de la frecuencia de medición de vibraciones para los equipos rotatorios fundamentales de la Central Termoeléctrica “Carlos Manuel de Céspedes”. **Fuente:** Elaboración propia.

| No. | Equipos por sistemas               | Clasificación del equipo | Medición Periódicas Vibraciones, chequeo de parámetros de estado y análisis espectral |           |         |           |
|-----|------------------------------------|--------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|-----------|---------|-----------|
|     |                                    |                          | Semanal                                                                               | Quincenal | Mensual | Bimensual |
| 1   | Ventiladores de tiro forzado       | B                        |                                                                                       | X         |         |           |
| 2   | Ventiladores recirculador de gases | B                        |                                                                                       |           | X       |           |
| 3   | Calentadores de aire regenerativo  | B                        |                                                                                       |           | X       |           |

**Tabla 3.6.** Modelo de la frecuencia de medición de vibraciones para los equipos rotatorios fundamentales de la Central Termoeléctrica “Carlos Manuel de Céspedes”. **Fuente:** Elaboración propia. **(Continuación)**

| No.     | Equipos por sistemas        | Clasificación del equipo | Medición Periódicas Vibraciones, chequeo de parámetros de estado y análisis espectral |           |         |           |
|---------|-----------------------------|--------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|-----------|---------|-----------|
|         |                             |                          | Semanal                                                                               | Quincenal | Mensual | Bimensual |
| 4       | Bombas de petróleo          | B                        |                                                                                       |           | X       |           |
| 5       | Turbina                     | A                        | X                                                                                     |           |         |           |
| 6       | Bombas de Agua de Alimentar | B                        |                                                                                       | X         |         |           |
| 7       | Bombas de Circulación       | B                        |                                                                                       |           | X       |           |
| 8       | Bombas condensado           | B                        |                                                                                       |           | X       |           |
| 9       | Bombas enfriamiento         | B                        |                                                                                       |           |         | X         |
| Totales |                             |                          | 1                                                                                     | 2         | 5       | 1         |

#### 3.4.7. Paso 4.7 Análisis de los resultados de la medición de las vibraciones en los equipos. Interpretación espectral.

Después de determinados los puntos y la frecuencia de las mediciones, de conocidos los instrumentos necesarios a utilizar, y de establecidos ya todos los patrones de referencia para cada equipo a analizar, se procede a la realización del último paso de la metodología expuesta en el capítulo anterior, el análisis de los resultados de la medición de las vibraciones en los equipos rotatorios.

Para la realización de este paso se va a tomar como ejemplo de los dos equipos que mayores pérdidas generaron según los resultados de la aplicación de la técnica

de Pareto analizado en el epígrafe 3.3, el Ventilador de Tiro Forzado 3 A de la Unidad No. 3 de la Central Termoeléctrica “Carlos Manuel de Céspedes”.

Lo primero que realizó fue la medición de las vibraciones en las chumaceras lado libre motor (CH 1), lado coplee motor (CH 2), lado coplee ventilador (CH 3) y lado libre ventilador (CH 4), tomándose 3 mediciones en los ejes vertical (Y), horizontal (X) y axial (Z). Para ello se utilizará el modelo de mediciones periódicas de vibraciones que se muestra en la **tabla 2.4** del **capítulo 2**.

A partir de lo descrito anteriormente quedaron como resultado de las mediciones los datos que se muestran a continuación en la **tabla 3.7**.

**Tabla 3.7.** Resultados de las mediciones periódicas de vibraciones al Ventilador de Tiro Forzado (VTF 3 A) de la Central Termoeléctrica “Carlos Manuel de Céspedes”.

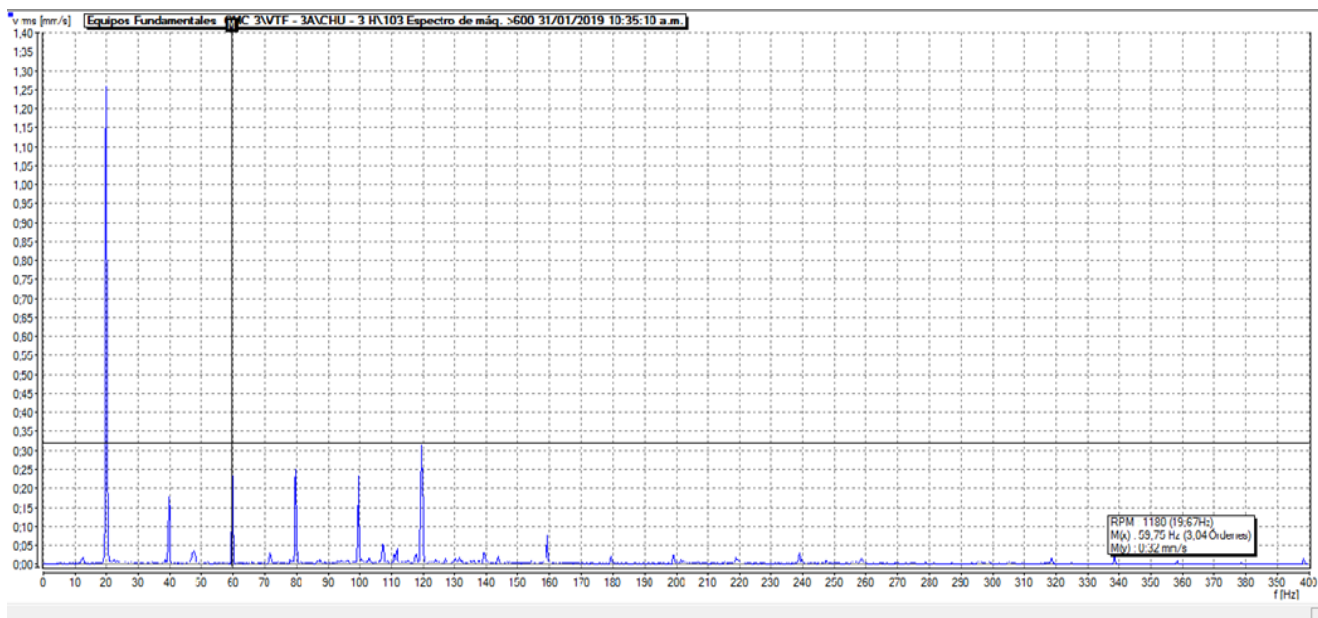
**Fuente:** Datos obtenidos Central Termoeléctrica “Carlos Manuel de Céspedes”.

| Mediciones Periódicas Unidad No.(3) CTE CMC |                           |                |           |              |            |
|---------------------------------------------|---------------------------|----------------|-----------|--------------|------------|
| <b>Equipo:</b>                              | VTF 3A                    | <b>Fecha:</b>  | 31/1/2019 | <b>Hora:</b> | 10:35 a.m. |
| <b>Puntos de Medición</b>                   | Posiciones de la Medición |                |           |              |            |
|                                             | Vertical (Y)              | Horizontal (X) |           | Axial (Z)    |            |
| CH 1                                        | 2.7                       | 2.8            |           | 1.7          |            |
| CH 2                                        | 3                         | 2              |           | 1.8          |            |
| CH 3                                        | 1                         | 5.5            |           | 3.1          |            |
| CH 4                                        | 0.9                       | 5.6            |           | 4.2          |            |

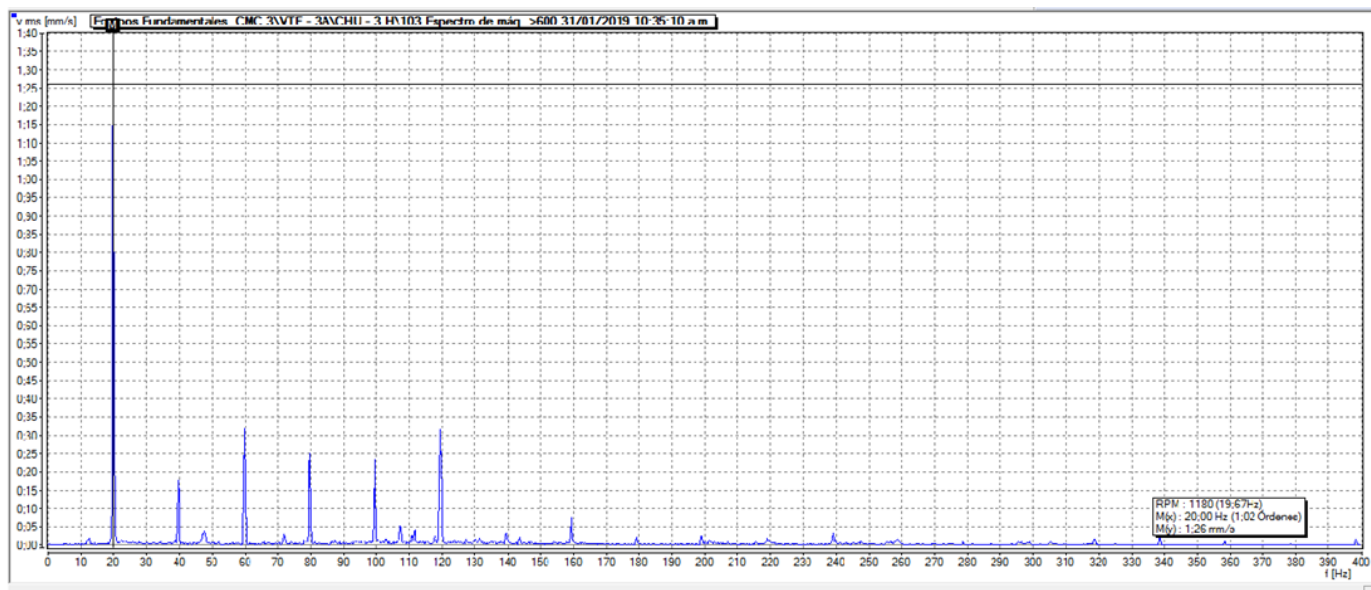
Se puede valorar en los de vibraciones a nivel total el crecimiento en el tiempo del valor de vibraciones en los puntos 3 y 4 en la dirección horizontal, aunque el ventilador según los patrones de referencia establecidos en la **tabla 3.5** del **epígrafe 3.4.5** se sitúa en el límite de trabajo aún admisible.

Al realizar el análisis espectral del punto 3 en las direcciones señaladas en el **epígrafe 3.4.3**, se tienen como resultados los que se muestran en las **tablas 3.8**,

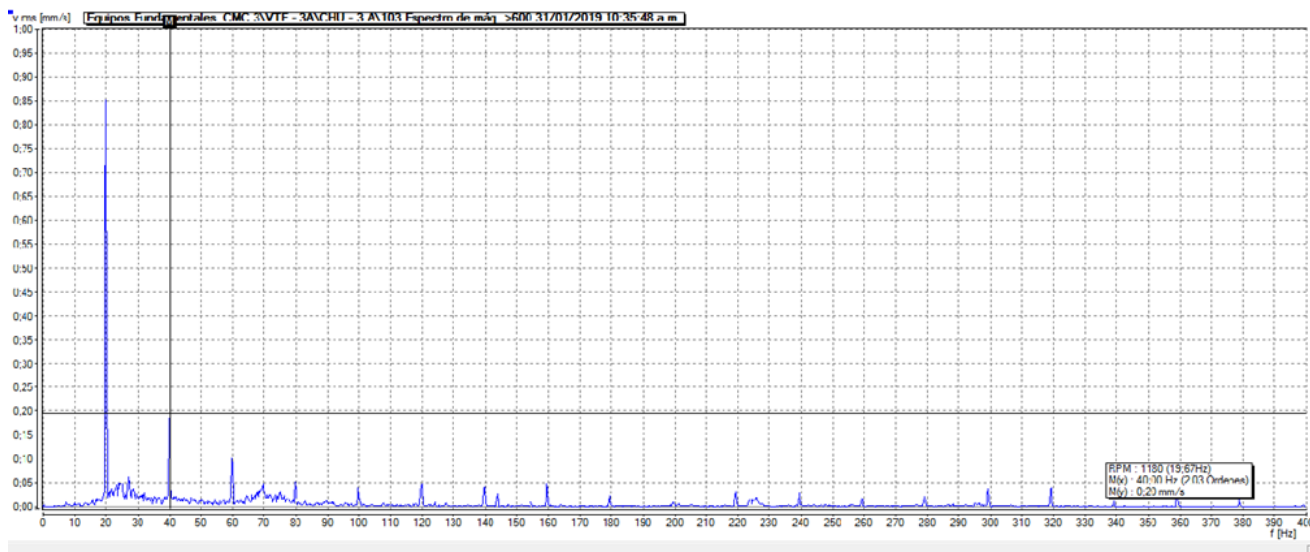
**3.9 y 3.10**, obtenidos de los gráficos espectrales extraídos de las mediciones con el instrumento VIBXpert II que se muestran en las **figuras 3.5, 3.6 y 3.7**.



**Figura 3.5.** Gráfica del análisis espectral dirección Radial (Vertical) puntos 3 y 4 obtenido con el instrumento VIBXpert II. **Fuente:** Central Termoeléctrica “Carlos Manuel de Céspedes”.



**Figura 3.6.** Gráfica del análisis espectral dirección Tangencial (Horizontal) puntos 3 y 4 obtenido con el instrumento VIBXpert II. **Fuente:** Central Termoeléctrica “Carlos Manuel de Céspedes”.



**Figura 3.7.** Gráfica del análisis espectral dirección Axial puntos 3 y 4 obtenido con el instrumento VIBXpert II. **Fuente:** Central Termoeléctrica “Carlos Manuel de Céspedes”.

El análisis espectral en el punto 3, a partir de la interpretación espectral de los gráficos espectrales que se muestran en las **figuras 3.5, 3.6 y 3.7 (ver tablas 3.8, 3.9 y 3.10)**, arrojaron como resultados una alteración en el primer armónico (1X) de la horizontal principalmente, apreciándose esto específicamente en la Tabla resumen **3.9**.

**Tabla 3.8.** Resultado del Análisis Espectral. Punto - 3 Radial (Vertical). **Fuente:** Elaboración propia.

| Ordenes | Frecuencia (Hz) | Veloc. mm/s RMS |
|---------|-----------------|-----------------|
| 1x      | 20.00           | 0.41            |
| 2x      | 39.75           | 0.5             |
| 3x      | 59.75           | 0.15            |

**Tabla 3.9.** Resultado del Análisis Espectral. Punto - 3 Tangencial (Horizontal).

**Fuente:** Elaboración propia.

| Ordenes | Frecuencia (Hz) | Veloc. mm/s RMS |
|---------|-----------------|-----------------|
| 1x      | <b>20.00</b>    | <b>5.5</b>      |
| 2x      | 40.00           | 0.35            |
| 3x      | 60.00           | 0.28            |
| 4x      | 79.25           | 0.07            |

**Tabla 3.10.** Resultado del Análisis Espectral. Punto - 3 Axial. **Fuente:** Elaboración propia.

| Ordenes | Frecuencia (Hz) | Veloc. mm/s RMS |
|---------|-----------------|-----------------|
| 1x      | 19.75           | 0.12            |
| 2x      | 39.75           | 0.26            |
| 3x      | 59.50           | 0.08            |
| 4x      | 79.75           | 0.05            |
| 5x      | 99.25           | 0.02            |

El análisis espectral en el punto 4, a partir de la interpretación espectral de los gráficos espectrales que se muestran en las **figuras 3.5, 3.6 y 3.7**, arrojaron como resultados los datos que se muestran de manera resumida resumidos en las **tablas 3.11, 3.12 y 3.13**, y que nos brinda como información una alteración en el primer armónico (1X) de la horizontal principalmente que se puede apreciar específicamente en la **tabla 3.12**.

**Tabla 3.11.** Resultado del Análisis Espectral. Punto - 4 Radial Vertical vertical.

**Fuente:** Elaboración propia.

| Ordenes   | Frecuencia (Hz) | Veloc. mm/s RMS |
|-----------|-----------------|-----------------|
| <b>1x</b> | <b>19.75</b>    | <b>0.15</b>     |
| 2x        | 40.00           | 0.02            |
| 3x        | 60.00           | 0.04            |
| 4x        | 79.50           | 0.10            |
| 5x        | 99.50           | 0.02            |

**Tabla 3.12.** Resultado del Análisis Espectral. Punto - 4 Radial Horizontal. **Fuente:** Elaboración propia.

| Ordenes   | Frecuencia (Hz) | Veloc. mm/s RMS |
|-----------|-----------------|-----------------|
| <b>1x</b> | <b>20.00</b>    | <b>5.6</b>      |
| 2x        | 39.75           | 0.18            |
| 3x        | 59.50           | 0.17            |
| 4x        | 79.50           | 0.22            |
| 5x        | 100.00          | 0.03            |

**Tabla 3.13.** Resultado del Análisis Espectral. Punto - 4 Axial. **Fuente:** Elaboración propia.

| Ordenes | Frecuencia (Hz) | Veloc. mm/s RMS |
|---------|-----------------|-----------------|
| 1x      | 20.00           | 0.62            |
| 2x      | 39.25           | 0.02            |
| 3x      | 59.50           | 0.02            |
| 4x      | 79.50           | 0.02            |
| 5x      | 99.75           | 0.04            |

Luego de realizar el análisis espectral, se efectúan mediciones de fase para completar la interpretación espectral y poder determinar el posible defecto que puede tener el VTF - 4 A. Las mediciones de fase en las Chumaceras 3 y 4. Dan que los valores de fase en las direcciones vertical y horizontal esta opuestas a valores próximos a 90 grados (**ver tabla 3.14**).

**Tabla 3.14.** Resultados de las mediciones de fase en los puntos 3 y 4. **Fuente:** Elaboración propia.

| Dirección de la medición | Vertical Fase | Horizontal Fase |
|--------------------------|---------------|-----------------|
| Chumacera # 3            | 187           | 95              |
| Chumacera # 4            | 179           | 91              |

Después de realizado esto se puede decir que en el análisis espectral realizado se caracteriza por presentar los síntomas siguientes:

- Picos de gran amplitud a 1x rpm de giro en dirección radial. ( en 20 Hz aparece la amplitud máxima de la vibración en las direcciones Horizontales y Verticales en ch3 y Ch4)
- Escaso nivel de vibración a 1x rpm de giro en la dirección axial.
- Armónicos de la rotacional de baja amplitud. El resto de los armónicos (nx20 están acompañados por niveles de vibraciones n desde 1 hasta 5)
- Forma de onda sinusoidal a 1x rpm.
- La posición de los vectores en ángulos de CH3 y CH4 en la dirección radial horizontal se central de forma simétrica.

Teniendo en cuenta este análisis realizado, todo aparenta un **posible desbalance transitorio** en el VTF - 4A. Pero el ventilador, debido a que los valores globales de vibraciones encontrados en las mediciones periódicas realizadas a dicho equipo están dentro de los límites admisibles de trabajo, aunque por poco tiempo, se determinó que puede seguir trabajando, pero atendiendo a situaciones similares que se produjeron en años anteriores (según bases de datos), se recomienda mantener en observación las chumaceras del Ventilador en lo relacionado con ruido y temperaturas, así como variaciones crecientes de vibraciones y se debe planificar para un mantenimiento, un ensayo de balance para corregir dicho defecto.

### **3.5 Conclusiones parciales del capítulo III.**

En este capítulo se tuvieron en cuenta, puntos fundamentales referentes a las necesidades de la empresa, así como la aplicación de la metodología propuesta, donde se destacaron los siguientes aspectos imprescindibles:

- Clasificación de los equipos o sistemas atendiendo a la importancia de los mismos en el sistema productivo de la central.
- La aplicación del método de Pareto, el cual nos dio a conocer que los equipos rotatorios que presentan la mayor cantidad de averías son, las Bombas de Agua de Alimentar (BAA), y los Ventiladores de Tiro Forzado (VTF).
- Se realizó el análisis Causa – Efecto, donde se determinaron el origen, la raíz del problema, la Causa - Raíz que origina las fallas en los equipos rotatorios.
- Un aspecto muy importante que se abordó fue, la ubicación física de los puntos de medición en los equipos a diagnosticar.
- Se realizó un análisis a los resultados a las mediciones de los equipos rotatorios, tomando como ejemplo práctico el ventilador de tiro forzado 4 A, donde se encontró un crecimiento en el tiempo del valor de las vibraciones a nivel total, en los puntos 3 y 4 en la dirección horizontal de 5.5 y 5.6 mm/s, determinándose a partir del análisis espectral que tenía un posible desbalance.

## CONCLUSIONES GENERALES

Luego de terminado el estudio investigativo realizado en el presente trabajo, y sobre la base de la idea de mejorar la eficiencia productiva en la Termoeléctrica “Carlos Manuel de Céspedes”, y con el objetivo de poder logra esto en la empresa, se tuvo que trabajar de manera organizada y detallada con todo lo referente a este tema.

A continuación se abordara de manera sintetizada los aspectos más relevantes, que se tuvieron en cuenta para realizar este trabajo.

- Se realizó una revisión bibliográfica referente a las generalidades sobre el mantenimiento en las organizaciones, donde se abordaron varios aspectos importantes.
- Se caracterizó el mantenimiento en la central Termoeléctrica “Carlos Manuel de Céspedes” y se detalló, la falla, como un aspecto determinante en la capacidad productiva.
- Se puntualizaron los conceptos y terminologías, asociadas al parámetro Vibraciones, evidenciando que su aplicación y análisis es determinante en las nuevas técnicas del mantenimiento pro-activo.
- Se diseñó una metodología para poder aplicar en el mantenimiento pro-activo, mediante el diagnóstico de vibraciones en los equipos rotatorios.
- Se tuvieron en cuenta la implementación de varios aspectos importantes para poder llevar a cabo el diseño de la metodología.
- La categorización de los diferentes equipos rotatorios de la central.
- Un análisis detallado de los registros estadísticos de mantenimientos en la Termoeléctrica.
- La aplicación del método de Pareto.
- Clasificación de los equipos o sistemas atendiendo a la importancia de los mismos en el sistema productivo de la central.

- La aplicación del método de Pareto, el cual nos dio a conocer que los equipos rotatorios que presentan la mayor cantidad de averías son, las Bombas de Agua de Alimentar (BAA), y los Ventiladores de Tiro Forzado (VTF).
- Se realizó el análisis Causa – Efecto, donde se determinaron el origen, la raíz del problema, la Causa - Raíz que origina las fallas en los equipos rotatorios.
- Un aspecto muy importante que se abordó fue, la ubicación física de los puntos de medición en los equipos a diagnosticar.
- Se realizó un análisis a los resultados a las mediciones de los equipos rotatorios, tomando como ejemplo práctico el ventilador de tiro forzado 4 A, donde se encontró un crecimiento en el tiempo del valor de las vibraciones a nivel total, en los puntos 3 y 4 en la dirección horizontal de 5.5 y 5.6 mm/s, determinándose a partir del análisis espectral que tenía un posible desbalance.

Luego de tener en cuenta los aspectos fundamentales tratados en el presente trabajo investigativo, y de lograr el objetivo general, así como los objetivos específicos, se puede concluir que:

El diseño y aplicación de la metodología propuesta, si es efectiva.

## RECOMENDACIONES

1. Tener en cuenta esta metodología para aplicar el mantenimiento pro-activo en las demás termoeléctricas del país, así como en todas las industrias que tengan incorporados equipos roto-dinámicos.
2. Incorporarle a la metodología otros métodos de diagnósticos como: Análisis termográficos y Análisis de lubricación.
3. Establecer el cálculo de recuperación de la inversión, sobre la base de gastos en instrumentos y recursos humanos empleados en el diagnóstico, que demuestren la generación de ganancias que ofrece el mantenimiento pro-activo, u otros sistemas actuales del mantenimiento relacionado con el control de parámetros de estado y su relación con las fallas en los sistemas.

## BIBLIOGRAFÍA

- Alkaim, j. (2003). Metodología para incorporar conocimiento intensivo. (Tesis de opción al grado científico de Doctor en ingeniería de Producción) Universidad de Cienfuegos.
- A-MAQS, S. A (2022). *Introducción al análisis de vibraciones. El espectro de vibración* <https://a-maq.com/introduccion-al-analisis-de-vibraciones-4-el-espectro-de-vibracion/>
- Arias, A. (2006). Un modelo de gestión de mantenimiento hacia la excelencia, (Ponencia). *V Congreso Cubano de Mantenimiento*, La Habana, Cuba.
- Azima DLI, W. G. (1990 -2010). *Azima DLI, Introducción al Análisis de Vibraciones. Woburn: 300 TradeCenter, Suite 4610, Woburn, MA 01801 U.S.A.*
- Ballesterro Roble, F. (2017). *La Estrategia predictiva del mantenimiento industrial.* [www.preconcerto.com](http://www.preconcerto.com).
- Ballesterro Roble, F. (2017). *La Estrategia predictiva del mantenimiento industrial.* [www.preconcerto.com](http://www.preconcerto.com).
- Brüel & Kjær, S. (2001). [www.bkscom.com](http://www.bkscom.com). Obtenido de [bruelkjaer@bkes.com](mailto:bruelkjaer@bkes.com): <http://www.bkscom.com/>
- Chaviano Bernal, S. (2004). *Factibilidad Técnico-Económica de la Introducción del Sistema MBC en Equipos Rotodinámicos.*
- Fluke. (2023). Vibraciones. [Fluke.com. https://www.fluke.com/es-ar/informacion/blog/vibracion/descripcion-de-los-beneficios-del-monitoreo-y-el-analisis-de-las-vibraciones](https://www.fluke.com/es-ar/informacion/blog/vibracion/descripcion-de-los-beneficios-del-monitoreo-y-el-analisis-de-las-vibraciones)
- García Garrido, S. (2012). *Ingeniería de mantenimiento: Manual práctico para la gestión eficaz del mantenimiento.* Renovetec.
- García, F. (2015). Dialnet. [dialnet.unirioja.es: https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/5170939.pdf](https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/5170939.pdf)

- Garcia, G., & Quijano. (2004). *Mejora en la Confiabilidad operacional de las plantas de generación de energía eléctrica, desarrollo de una metodología de gestión de mantenimiento basado en el riesgo*.
- García, M. d. (2017). *Proyecto de mantenimiento*. biblus.us.es. Universidad de Sevilla:  
[https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/91421/fichero/Doc\\_TFG.pdf](https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/91421/fichero/Doc_TFG.pdf)
- Gonzales, F. (2007). *Auditoría del mantenimiento e indicadores de gestión*. Editorial FC.
- Group, Q. (2022). *Cómo se realiza el análisis de vibraciones*.  
<https://qualitymant.com/como-se-realiza-el-analisis-de-vibraciones-en-mantenimiento/>.  
<https://qualitymant.com/como-se-realiza-el-analisis-de-vibraciones-en-mantenimiento/>
- Jaramillo, P. (2004). *El Futuro de la Función de Mantenimiento*. Publicado en  
<http://www.soproteysia.com.co>.
- Jeira, & Gibson. (2004). Aspectos Generales sobre La gestión del Mantenimiento. Organización De Esta Actividad y Sus Responsabilidades.
- Leiva Castro, D. y et. al. (1996). *Metodología y diseño para la implantación del Sistema Alternativo de Mantenimiento a Equipos Rotatorios en la C.T.E Carlos M. De Céspedes Cienfuegos*
- Moretti, J. S. (2014). *Mantenimientos y Vibraciones*. Universidad de Chile. O  
[repositorio.uchile.cl](https://repositorio.uchile.cl)  
[https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/116263/cf-sanchez\\_jm.pdf?sequence=1](https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/116263/cf-sanchez_jm.pdf?sequence=1)
- Morrow, L. (1973). *Manual de mantenimiento industrial: organización, ingeniería mecánica, eléctrica, química, civil, procesos y sistemas*.
- Moubray, J. (1997). *Mantenimiento Centrado en Confiabilidad* Ellman, Suerio y Asociados.

NC- ISO10816-1. (2005). NC- ISO 10816-1: 1995. La Habana.

Ninive, R. (2008). [ninive.ismm.edu.cu.  
https://ninive.ismm.edu.cu/bitstream/handle/123456789/1501/SuarezLores.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://ninive.ismm.edu.cu/bitstream/handle/123456789/1501/SuarezLores.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Norma NC-ISO 2041, O. N. (2007). Norma NC-ISO 2041, 2007. [www.nc.cubaindustria.cu](http://www.nc.cubaindustria.cu)

Norma-ISO-2372-3 (2023). pdfcoffee. [https://pdfcoffee.com/:  
https://pdfcoffee.com/norma-iso-2372-3-pdf-free.html](https://pdfcoffee.com/norma-iso-2372-3-pdf-free.html)

Portuondo Pichardo, F. M. (1990). *Sistema Alterno de Mantenimiento. Ingeniería Industrial*

Povedano, G. D. (2021). Terotecnic. <https://terotecnic.com/formacion-industrial/el-diagrama-de-pareto/>

Rojotse. (2023). Tu guía de aprendizaje. [https://tuguiadeaprendizaje.co/:  
https://tuguiadeaprendizaje.co/como-aplicar-el-diagrama-de-ishikawa-en-el-aula/](https://tuguiadeaprendizaje.co/https://tuguiadeaprendizaje.co/como-aplicar-el-diagrama-de-ishikawa-en-el-aula/)

Santamaría, C. G. (2017). uvadoc.uva.es. Universidad de Valladolid : <https://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/10324/24137/TFG-P-559.pdf?sequence=1>

Sicma21. (2023). [https://www.sicma21.com/que-es-el-analisis-de-vibraciones/  
https://www.sicma21.com/que-es-el-analisis-de-vibraciones/](https://www.sicma21.com/que-es-el-analisis-de-vibraciones/)

Soluciones, V. (2023). [www.valborsoluciones.com.  
https://www.valborsoluciones.com/mantenimiento/analisis-de-vibraciones-mantenimiento-predictivo/](https://www.valborsoluciones.com/mantenimiento/analisis-de-vibraciones-mantenimiento-predictivo/)

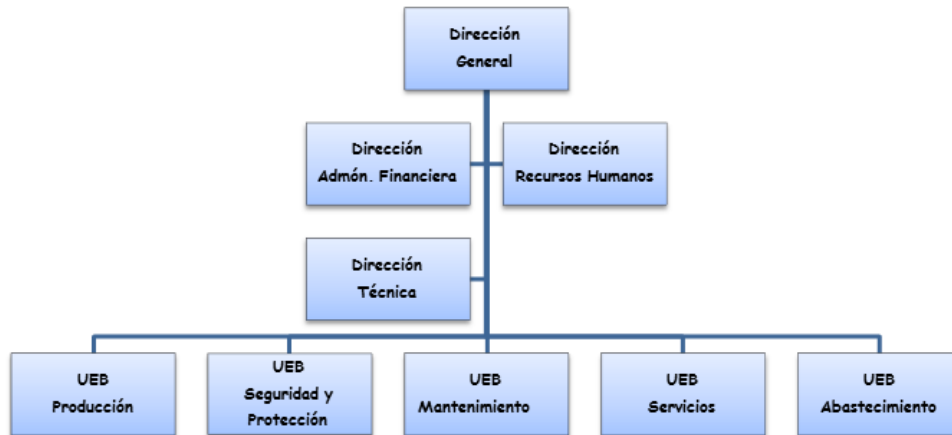
Suniaga, S. (2023). Fractal. Mantenimiento Proactivo: Clave para prevenir fallas y maximizar la eficiencia: <https://www.fractal.com/es/blog/mantenimiento-proactivo>

Torres-Rodríguez. (2010). SciELO Cuba.com.  
[http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S181559442010000100002](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S181559442010000100002)

Universidad Tecnológica de La Habana "José Antonio Echeverría (CUJAE). (2005).  
[ingenieriamecanica.cujae.edu.cu](http://ingenieriamecanica.cujae.edu.cu).  
<https://ingenieriamecanica.cujae.edu.cu/index.php/revistaim/article/download/223/563/571>

## ANEXOS

**ANEXO A.1.** Esquema organizativo de la Central Termoeléctrica “Carlos Manuel de Céspedes”.



**Figura A.1.1** - Esquema organizativo general de la Central Termoeléctrica “Carlos Manuel de Céspedes”.

**Fuente:** Dirección de Recursos Humanos. CTE “Carlos Manuel de Céspedes”.

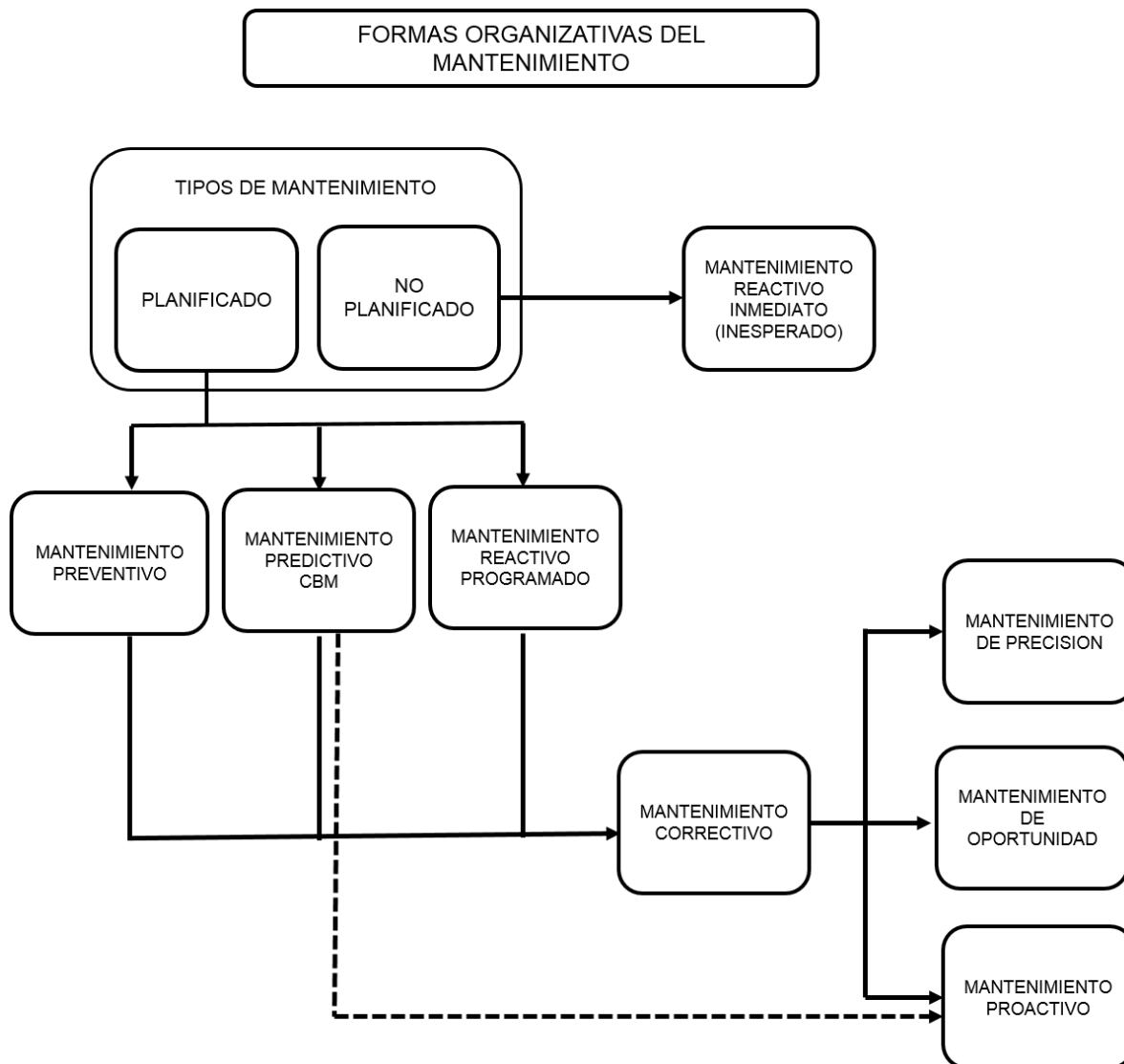


**Figura A.1.2.** - Esquema organizativo de la Dirección Técnica.

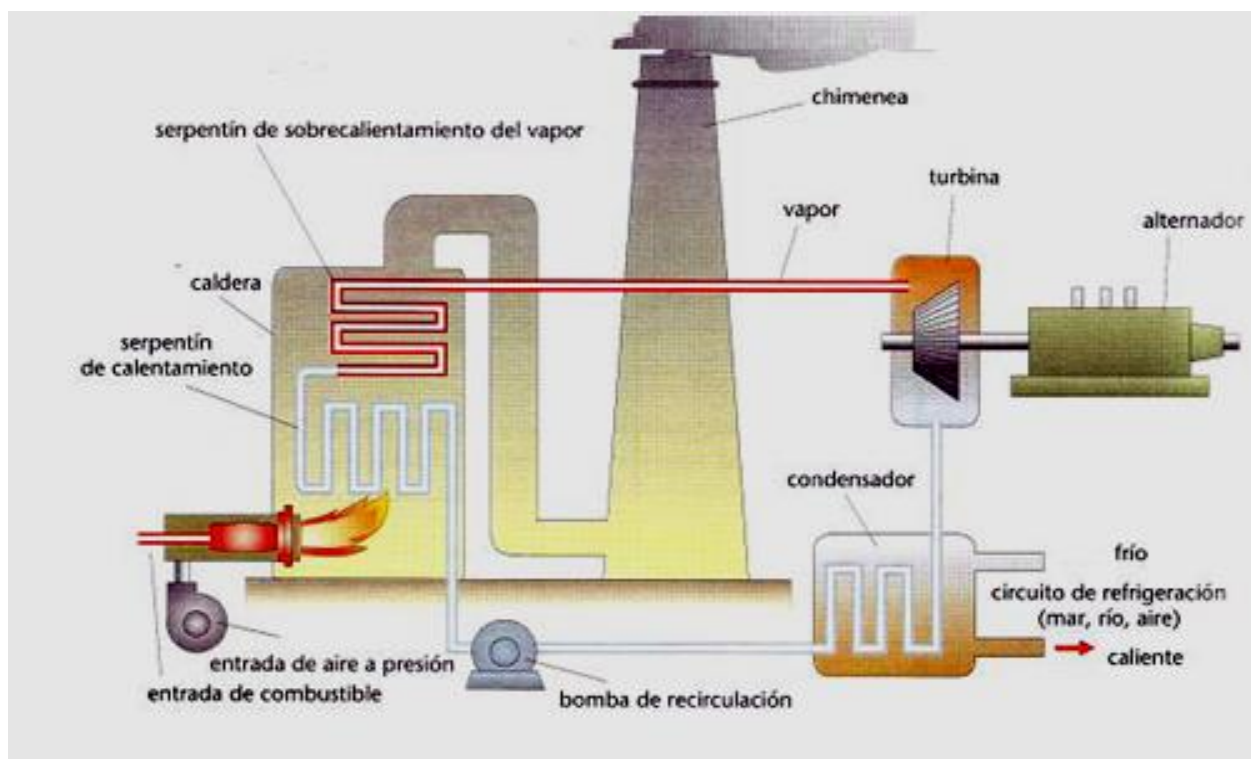
**Fuente:** CTE “Carlos Manuel de Céspedes”.

## ANEXO A.2. Esquema estratégico del mantenimiento en la industria.

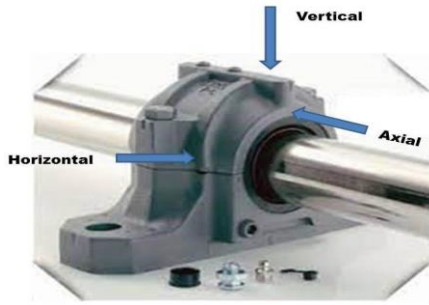
Fuente: (Ballestero Roble, 2017)



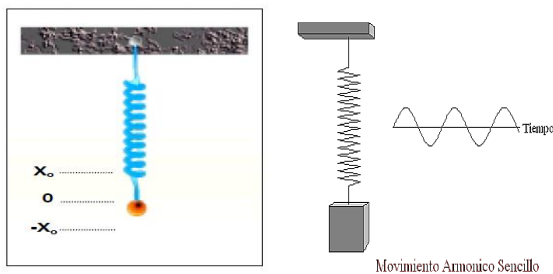
**Anexo A.3.** Esquema simplificado del funcionamiento de una central térmica.



## ANEXO A.4 Aspectos referentes a las vibraciones.

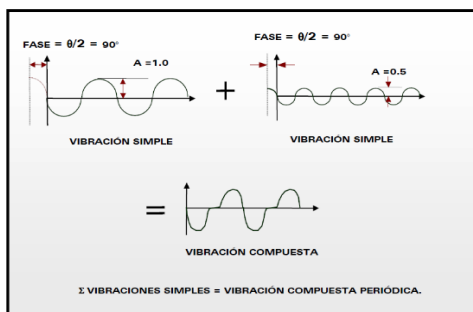


Orientaciones que se tienen en cuenta para las mediciones de vibraciones.



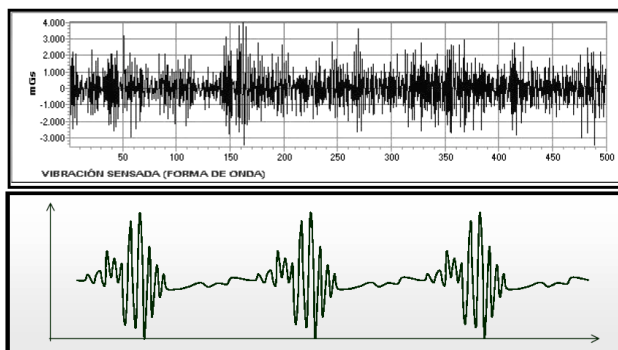
### Vibración Simple:

La base principal de las señales de vibración en el dominio del tiempo son las ondas sinusoidales. Estas son las más simples y son la representación de las oscilaciones puras. (Mourdoch, 2008)



### Vibración Compuesta:

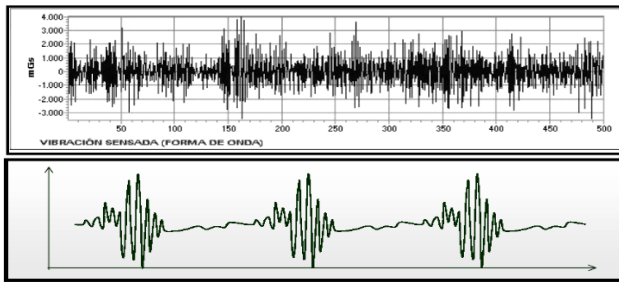
Una señal compuesta es una sumatoria de varias señales sinusoidales que comprenden cada uno de los componentes que se encuentran en la máquina, más todos los golpeteos y vibraciones aleatorias. El resultado es una señal como la ilustrada en la figura. (Mourdoch, 2008)



### Vibración Aleatoria y Golpeteos Intermitentes:

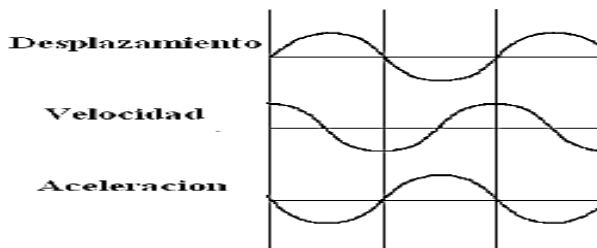
La vibración aleatoria no cumple con patrones especiales que se repiten constantemente o es demasiado difícil detectar donde comienza un ciclo y donde termina. Estas vibraciones están asociadas generalmente a turbulencia, a problemas de lubricación y contacto metal – metal en elementos rodantes o a cavitación en bombas. (Mourdoch, 2008)

## ANEXO A.5. Aspectos referentes a las vibraciones.



### Vibración Aleatoria y Golpeteos Intermitentes:

La vibración aleatoria no cumple con patrones especiales que se repiten constantemente o es demasiado difícil detectar donde comienza un ciclo y donde termina. Estas vibraciones están asociadas generalmente a turbulencia, a problemas de lubricación y contacto metal – metal en elementos rodantes o a cavitación en bombas. (Mourdoch, 2008)

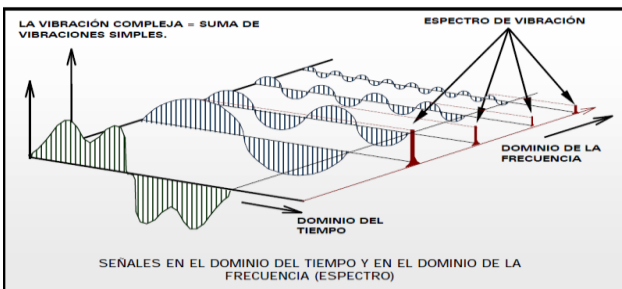


### Unidades de vibración

Desplazamiento ----- (micrones)

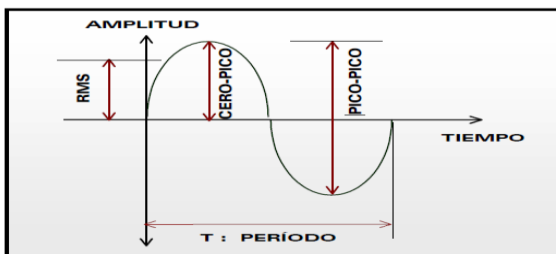
Velocidad ----- (mm/s)

Aceleración ----- (mm/s<sup>2</sup> G)



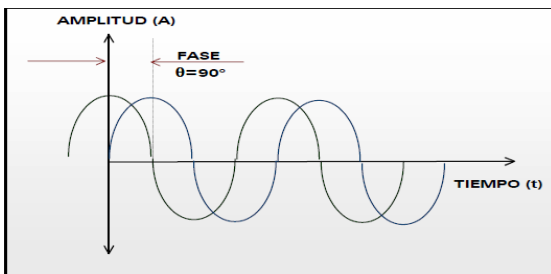
### Espectros

Existen otras formas para realizar un estudio de vibraciones, entre las cuales se encuentra mirar esta señal en el dominio de la frecuencia. Esta es la gráfica de Amplitud vs. Frecuencia y es conocida con el nombre de **espectro**. Esta es la mejor herramienta que se tiene actualmente para el análisis de maquinaria. (Mourdoch, 2008)



### Amplitud

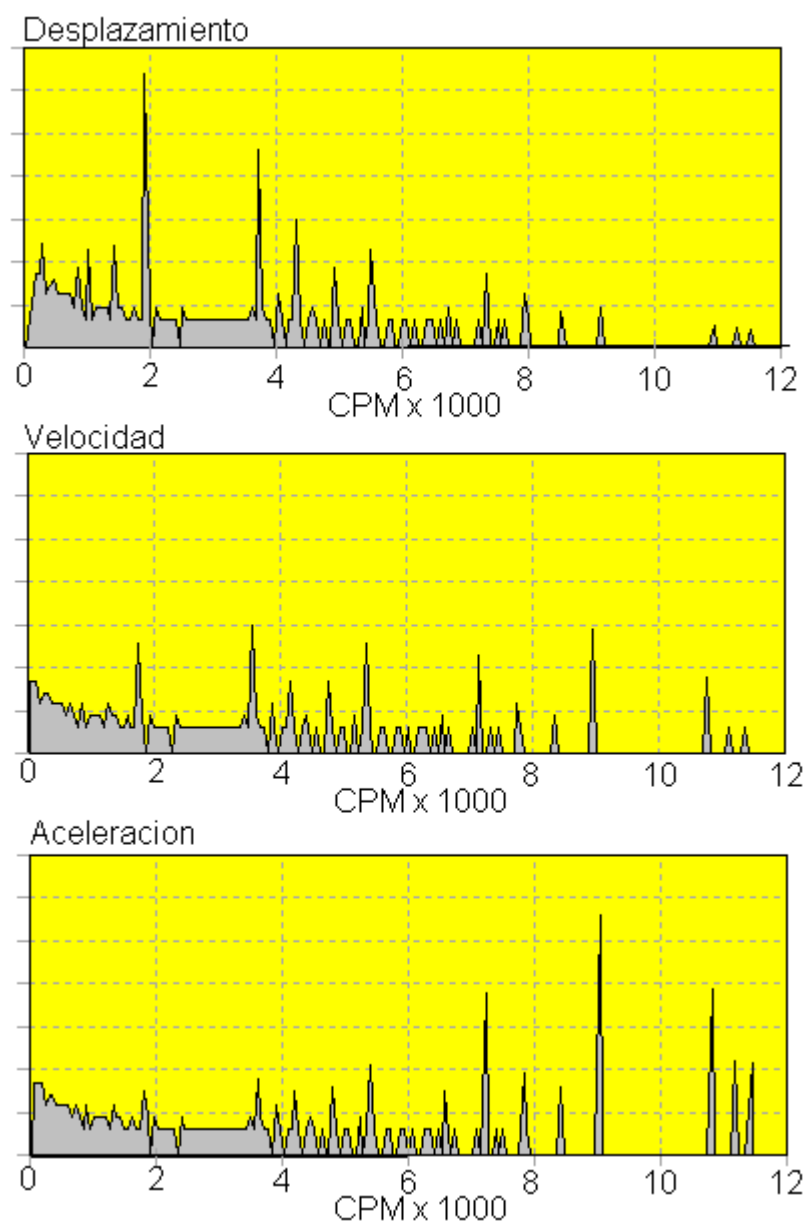
La amplitud desde el punto de vista de las vibraciones es cuanta cantidad de movimiento puede tener una masa desde una posición neutral. La amplitud se mide generalmente en valores pico-pico para desplazamiento y valores cero-pico y RMS para velocidad y aceleración. (Mourdoch, 2008)



### Fase

La fase es una medida de tiempo entre la separación de dos señales, la cual puede ser relativa o absoluta. Generalmente es encontrada en grados. La figura muestra dos señales sinusoidales de igual amplitud y período, pero separadas 90 grados, lo cual indica que ambas curvas están desfasadas 90 grados. (Mourdoch, 2008)

**ANEXO A.6.** Representacion espectral del (desplazamiento, velocidad y aceleracion).



## ANEXO A.7. Resumen espectral de fallas más frecuentes.

**Tabla A.7.1. Desbalance. Fuente:** (Azima DLI, 1990 -2010)

|                                | Frecuencia de excitación | Plano dominante | Amplitud | Caracter espec. del Envoltente      | Comentarios                                                                                     |
|--------------------------------|--------------------------|-----------------|----------|-------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Desbalanceo de la masa Termale | 1X                       | radial*         | Uniforme | Banda Angosta                       | Flexión debida tensiones estáticos puede causar un incremento de la amplitud con la temperatura |
| Dinámico                       | 1X                       | radial          |          | Por lo general algunos armónicos 1X | Forma mas común desbalanceo                                                                     |
| Par de fuerzas                 | 1X                       | radial, axial   |          |                                     |                                                                                                 |
| Rotor sobresaliente            | 1X                       | axial, radial   |          |                                     |                                                                                                 |

**Tabla A.7.2. Desalineación. Fuente:** (Azima DLI, 1990 -2010)

| Fuente de Vibración               | Frecuencia de excitación                       | Plano dominante | Amplitud      | Caracter espec. del Envoltente                                   | Comentarios                                                                  |
|-----------------------------------|------------------------------------------------|-----------------|---------------|------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| Desalineación angular             | 1X, 2X                                         | axial           | Uniforme      | Banda Angosta                                                    | La mayoría de las desalineaciones son una combinación de paralelo y angular. |
| Desalieación paralelo             | 1X, 2X                                         | radial          | Uniforme      | Banda Angosta                                                    | En largos acoplamientos, 1X será mas alto.                                   |
| Combinación de paralelo y angular | 1X,2X                                          | radial, axial   | Uniforme      | Banda Angosta                                                    | Desalineación también se ve múltiplos de 2X.                                 |
| Rodamiento chueco                 | 2X, 1X incrementados y tonos de rodamiento     | radial, axial   | Alta Uniforme | Banda Angosta                                                    | Generalmente acompañada de componentes axiales.                              |
| Impulsora desalineada             | 2X, incremento en armónicos de ritmo de alabes | radial          | Uniforme      | Banda Angosta                                                    | Generalmente acompañada de amplitudes bajas axiales.                         |
| Desaliniamiento de engranes       | Fuerte ritmo de engranaje                      | radial, axial   | Uniforme      | Generalmente bandas laterales alrededor del ritmo del engranaje. | Armónicos del engranaje son comunes.                                         |

**Tabla A.7.3. Flexión. Fuente:** (Azima DLI, 1990 -2010)

| Fuente de Vibración                  | Frecuencia de excitación | Plano dominante | Amplitud | Caracter espec. del Envolvente               | Comentarios                                                 |
|--------------------------------------|--------------------------|-----------------|----------|----------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| Flecha con exflexión ligera          | 1X, 2X                   | radial, axial   | Uniforme | Banda Angosta                                | Movimiento centrado en el acoplamiento parece desbalanceo   |
| Flecha con exflexión al acoplamiento | 1X, 2X                   | radial, axial   | Uniforme | Banda Angosta<br>Quizas armónicos de 2X, 3X. | Movimiento centrado en el acoplamiento parece desalineación |

**Tabla A.7.4. Problemas de rodamientos con gorriones. Fuente:** (Azima DLI, 1990 -2010)

| Fuente de Vibración                                                | Frecuencia de excitación         | Plano dominante | Amplitud | Caracter espec. del Envolvente                        | Comentarios                                                                                                                   |
|--------------------------------------------------------------------|----------------------------------|-----------------|----------|-------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Remolino de Aceite                                                 | 0.38X, hasta 0.48X               | Radial          |          | Pico Agudo                                            |                                                                                                                               |
| Latigazo de Aceite                                                 | 0.38X, hasta 0.48X               | Radial          |          | Pico Agudo                                            | Movimiento excéntrico en la masa del rotor parece desbalanceo. Movimiento excéntrico en el acoplamiento parece desalineación. |
| Juego excesivo en el rodamiento                                    | Armónicos de 1X                  | Radial          |          | Protuberancia en la serie de los armónicos            | 4X hasta 8X y/o 7X hasta 15X.                                                                                                 |
| Holgura en el rodamiento con Gorriones. Rechina                    | 0.5X, 1X                         | Radial          |          | Armónicos 0.5X                                        |                                                                                                                               |
| Rodamientos de Gorriones de Empuje. Rodamientos Zapatas. Kingsbury | 1X, Ritmo de la zapata Kingsbury | Axial           |          | Armónicos 1X, Armónicos del ritmo de zapata Kingsbury | Generalmente seis                                                                                                             |

**Tabla A.7.5.** Problemas de rodamientos con elementos rodantes. **Fuente:** (Azima DLI, 1990 -2010)

| Fuente de Vibración                                                                             | Frecuencia de excitación                    | Plano dominante | Amplitud             | Caracter espec. del Envolvente                   | Comentarios                                                     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|-----------------|----------------------|--------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|
| Anillo interior defectuoso.<br>Defecto pequeño                                                  | bpfi, armónicos de bpfi                     | radial          | Uniforme             | Picos sincrónicos                                | Carga Radial                                                    |
| Defecto interior defectuoso.<br>Un defecto moderado                                             | bpfi con armónicos y bandas laterales de 1X | radial          | Modulado en Amplitud | Picos no sincrónicos con bandas laterales de 1X. | Niveles de carga radial incrementados                           |
| Anillo interior defectuoso.<br>Dos o tres defectos pequeños.                                    | bpfi y armónicos.<br>Radial prominentes     | radial          | Alta, Uniforme       | Banda Ancha                                      | El ruido de banda ancha incrementa                              |
| Anillo interior defectuoso.<br>Múltiples pequeños defectos<br>Asperosidad alrededor del anillo. | bpfi y armónicos prominentes                | Radial          | Alto, Uniforme       | Picos no Sincrónicos                             | El ruido de banda ancha incrementa                              |
| Anillo exterior defectuoso.<br>Un pequeño defecto                                               | bpfo y armónicos                            | Radial          | Uniforme             | Picos no Sincrónicos                             | Los armónicos tienen un más alto que la frecuencia fundamental. |
| Anillo exterior defectuoso<br>Un solo defecto moderado                                          | bpfo y armónicos                            | Radial          | Uniforme             | Picos no Sincrónicos                             | El ruido de banda ancha incrementa                              |
| Bola o rodillo defectuoso.<br>(Único)                                                           | bsf y armónicos                             | Radial          | Alta Uniforme        | Banda Angosta                                    |                                                                 |
| Bolas defectuosas (varias)                                                                      | bsf y armónicos                             | Radial          | Uniforme             | Banda Angosta                                    | El ruido de banda ancha incrementa                              |

Observen:

x: frecuencia del rotación

ftf: frecuencia fundamental de tren (aprox 0.38 hasta 0.42)

bsf: frecuencia de rotación de bola (aprox 1.5X hasta 3X)

bpfi: frecuencia de paso de bola, anillo interior (aprox. 4X hasta 10X)

bpfo: frecuencia de paso de bola, anillo exterior (aprox. 2X hasta 7X)

**Tabla A.7.5.** Problemas de rodamientos con elementos rodantes. **Fuente:** (Azima DLI, 1990 -2010). (Continuación).

| Fuente de Vibración                         | Frecuencia de excitación                  | Plano dominante | Amplitud         | Caracter espec. del Envolente | Comentarios                                                                                 |
|---------------------------------------------|-------------------------------------------|-----------------|------------------|-------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|
| Jaula defectuosa. Rota en un lugar.         | Ruido de banda ancha                      | Radial          | Uniforme         | Banda ancha                   | Nivel de ruido bajo                                                                         |
| Jaula rota en pedazos                       | Ruido de banda ancha                      | Radial          | Uniforme         | Banda Ancha                   | Ruido causado por los pedazos de la jaula en el rodamiento                                  |
| Precarga o lubricación inadecuada           | Ruido de alto frecuencia "montón de heno" | Radial          |                  | Banda Ancha                   | El ruido de banda ancha incrementa                                                          |
| Holgura del rodamiento girando en la flecha | Armónicos 1X                              | Radial          |                  | Banda Angosta                 | Número y amplitud de los armónicos función de la holgura.                                   |
| Holgura en le carter                        | 1X, 2X, 3X                                | Radial          |                  | Banda Agosta                  |                                                                                             |
| Holgura extrema o falla                     | 0.5X y Armónicos                          | Radial          |                  |                               | Línea de base del ruido de baja frecuencia se va elevando.                                  |
| Juego excesivo en un rodamiento             | Armónicos 0.5X, 1X                        | Radial          |                  |                               | 4X hast 8X o 7X hasta 15X                                                                   |
| Rodamiento Chueco                           | 1X, 2X, Tonos de rodamiento               | Axial, Radial   | Elevado Uniforme | Banda Angosta                 | Diferencia de fase de 180 grados en medidas axiales en cada lado del cárter del rodamiento. |

**Tabla A.7.6.** Holgura mecánica. **Fuente:** (Azima DLI, 1990 -2010)

| Fuente de Vibración                      | Frecuencia de excitación | Plano dominante         | Amplitud | Caracter espec. del Envolente | Comentarios                                |
|------------------------------------------|--------------------------|-------------------------|----------|-------------------------------|--------------------------------------------|
| Holgura de las base                      | Armónicos 1X             | Generalmente tangencial | Uniforme | Banda Angosta                 | Indicado por flexibilidad de la base       |
| Holgura en Rodamiento Gorrón             | Armónicos 1X             | Radial                  | Uniforme | Banda Angosta                 | Los armónicos se pueden extender hast 10X. |
| Holgura extrema de rodamiento con gorrón | Armónicos 0.5X           | Radial                  | Uniforme |                               | A veces también hay armónicos 0.25X.       |

**Tabla A.7.7.** Problemas en bombas. **Fuente:** (Azima DLI, 1990 -2010).

| <div> <div>Observen</div> <div> V = número de alabes de la bomba<br/> T = número de dientes del engrane<br/> S = número de hilos en las rosca </div> </div> |                          |                 |                              |                               |                                                                                                                                                                       |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|-----------------|------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Fuente de Vibración                                                                                                                                         | Frecuencia de excitación | Plano dominante | Amplitud                     | Caracter espec. del Envolente | Comentarios                                                                                                                                                           |
| Holgura no rotativa                                                                                                                                         | 1X, 2X, 3X               | Radial          | Uniforme                     | Banda Angosta                 | Armónicos hasta 10 X                                                                                                                                                  |
| Holgura rotativa (rotores, impulsores, etc.)                                                                                                                | Paso de alabes, = V      | Radial          | Varía de arranque a arranque | Banda Angosta                 | A veces también armónicos 0.5X                                                                                                                                        |
| Bombas centrífugas con V alabes                                                                                                                             | Paso de alabes           | Radial          | Ritmo de alabes fluctuando   | Armónicos de la bomba         | En bombas largas la amplitud más fuerte ocurre al ritmo de los alabes. En bombas más pequeñas, la amplitud más fuerte ocurre a los armónicos del ritmo de los alabes. |
| Bombas con engranes de T dientes                                                                                                                            | Engranaje = Tx           | Radial          |                              |                               | Más que una voluta de descarga (como en bombas con rotores múltiples) creará armónicos de la frecuencia de engranaje                                                  |
| Rotor Rozando                                                                                                                                               | 0.5X, 1X                 | Radial          | Uniforme                     | Banda angosta                 | Puede excitar el rotor críticamente                                                                                                                                   |
| Bombas a Husillo                                                                                                                                            | SX                       | Radial          |                              |                               | Número de hilos en la rosca                                                                                                                                           |
| Cavitación o hambruna                                                                                                                                       | Aleatorio                | Radial          | Fluctúa                      | Banda Ancha                   | A veces ruido aleatoria, hasta 20 kHz                                                                                                                                 |

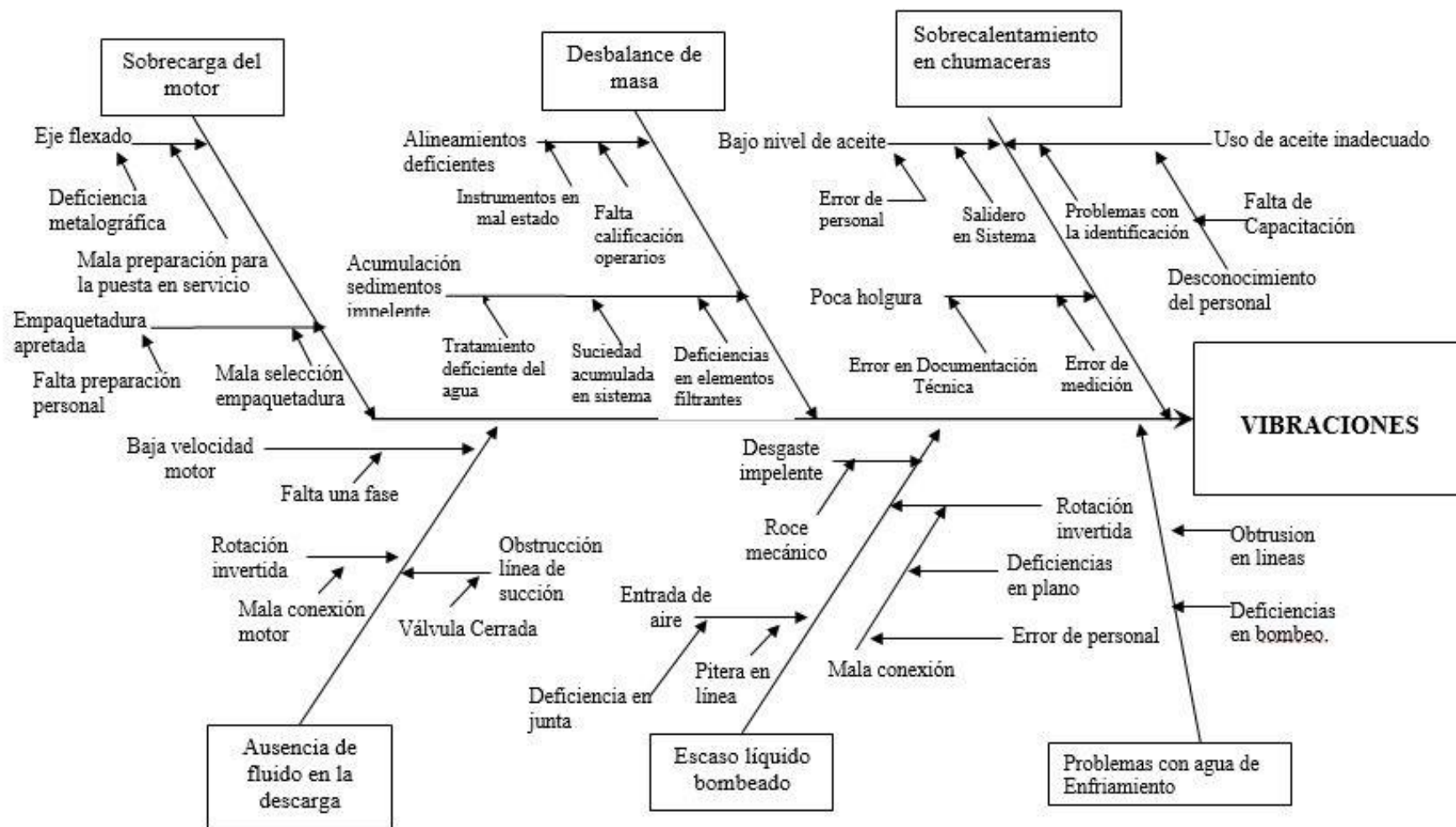
**Tabla A.7.8.** Problemas en ventiladores. **Fuente:** (Azima DLI, 1990 -2010)

| Fuente de Vibración                                   | Frecuencia de excitación                | Plano dominante | Amplitud | Caracter espec. del Envolente | Comentarios                             |
|-------------------------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------|----------|-------------------------------|-----------------------------------------|
| Problema de juego de aspa y del carter del ventilador | Ritmo de aspas =X veces el número aspas | Radial          | Uniforme | Banda Angosta                 | A veces hay armónicos al paso de aspas. |
| Desbalanceo del ventilador                            | 1X                                      | Radial          | Uniforme | Banda Angosta                 |                                         |
| Problema de paso                                      | 1X                                      | Axial           | Uniforme | Banda Angosta                 |                                         |
| Velocidad de aire desigual                            | Paso de Aspas                           | Radial          | Uniforme | Banda Angosta                 |                                         |

**Tabla A.7.9.** Problemas en Turbinas. **Fuente** (Azima DLI, 1990 -2010)

| <b>Fuente de Vibración</b> | <b>Frecuencia de excitación</b> | <b>Plano dominante</b> | <b>Amplitud</b> | <b>Caracter espec. del Envolvente</b> | <b>Comentarios</b>                                                                                               |
|----------------------------|---------------------------------|------------------------|-----------------|---------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Problema de juego de rotor | Ritmo de paso de alabes rotor   | Radial                 | Uniforme        | Banda Angosta                         |                                                                                                                  |
|                            |                                 | Radial                 | Uniforme        | Banda Angosta                         | Los Armónicos por lo general son más altos en nivel que 1X. Bandas laterales alrededor del paso de alabes en 1X. |

**Anexo A.8.** Diagrama Causa - Efecto de las vibraciones en bombas y ventiladores.



**Figura A.8.1.** Diagrama Causa - Efecto de las vibraciones en bombas y ventiladores. **Fuente:** Elaboración propia.

**Anexo A.9.** Pérdidas de sistemas por año en las unidades No.3 y No.4 de la Central Termoeléctrica “Carlos Manuel de Céspedes”.

**Tabla A.9.1.** Pérdidas de sistemas por año en las unidades No.3 y No.4 de la Central Termoeléctrica “Carlos Manuel de Céspedes”. **Fuente:** CTE “Carlos Manuel de Céspedes”.

| Sistemas                             | Pérdidas por Sistemas | 2010     | 2011    | 2012    | 2013    | 2014    | 2015    | 2016    | 2017    | 2018    | 2019   | 2020    | 2021    | 2022    | Total     |
|--------------------------------------|-----------------------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|--------|---------|---------|---------|-----------|
| Turbina                              | Cantidad de averías   | 0        | 0       | 0       | 0       | 12      | 0       | 0       | 0       | 0       | 0      | 0       | 0       | 0       | 12        |
|                                      | Horas                 | 0        | 0       | 0       | 0       | 51,73   | 0       | 0       | 0       | 0       | 0      | 0       | 0       | 0       | 51,73     |
|                                      | Megawats              | 0        | 0       | 0       | 0       | 1962,5  | 0       | 0       | 0       | 0       | 0      | 0       | 0       | 0       | 1962,5    |
| Ventiladores de Tiro Forzado         | Cantidad de averías   | 13       | 8       | 13      | 8       | 2       | 4       | 16      | 11      | 0       | 3      | 4       | 0       | 3       | 85        |
|                                      | Horas                 | 65,92    | 55,16   | 28,36   | 32,47   | 1,17    | 67,8    | 75,62   | 79,72   | 0       | 8,96   | 28,41   | 0       | 7,6     | 451,19    |
|                                      | Megawats              | 7419,02  | 3408,78 | 2981,47 | 3246,26 | 86,78   | 6851,05 | 10778   | 8610,72 | 0       | 681,63 | 611,14  | 0       | 846,46  | 45521,26  |
| Calentadores de Aire Regenerativos   | Cantidad de averías   | 20       | 11      | 6       | 3       | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 0      | 0       | 0       | 0       | 40        |
|                                      | Horas                 | 92,28    | 70,22   | 133,08  | 27,29   | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 0      | 0       | 0       | 0       | 322,87    |
|                                      | Megawats              | 8617,95  | 3619,84 | 20940,2 | 2128,62 | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 0      | 0       | 0       | 0       | 35306,65  |
| Ventiladores Recirculadores de Gases | Cantidad de averías   | 0        | 1       | 0       | 1       | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 0      | 0       | 0       | 0       | 2         |
|                                      | Horas                 | 0        | 24      | 0       | 1,3     | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 0      | 0       | 0       | 0       | 25,3      |
|                                      | Megawats              | 0        | 192     | 0       | 153,4   | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 0      | 0       | 0       | 0       | 345,4     |
| Bombas de Agua de Alimentar          | Cantidad de averías   | 8        | 24      | 3       | 13      | 10      | 2       | 0       | 0       | 5       | 2      | 3       | 2       | 35      | 107       |
|                                      | Horas                 | 14,45    | 76,44   | 10,4    | 46,17   | 45,01   | 6,55    | 0       | 0       | 19,41   | 1,68   | 9,58    | 14,95   | 462,02  | 706,66    |
|                                      | Megawats              | 1043     | 5842,6  | 1028,8  | 4445,65 | 6341,58 | 226,85  | 0       | 0       | 2855,38 | 86,73  | 1256,69 | 903,95  | 19713,4 | 43744,64  |
| Bombas de Condensado                 | Cantidad de averías   | 2        | 2       | 2       | 1       | 1       | 0       | 0       | 0       | 0       | 7      | 1       | 0       | 22      | 38        |
|                                      | Horas                 | 2,37     | 18,77   | 5,87    | 0,48    | 9,98    | 0       | 0       | 0       | 0       | 5,18   | 2,07    | 0       | 481,13  | 525,85    |
|                                      | Megawats              | 184,86   | 1464,06 | 304,86  | 44,64   | 778,44  | 0       | 0       | 0       | 0       | 438,14 | 159,39  | 0       | 24423,6 | 27797,97  |
| Bombas de Petróleo                   | Cantidad de averías   | 0        | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 2       | 1       | 0      | 1       | 2       | 2       | 8         |
|                                      | Horas                 | 0        | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 4,75    | 4,77    | 0      | 5,33    | 2,35    | 18,07   | 35,27     |
|                                      | Megawats              | 0        | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 750,5   | 753,66  | 0      | 842,14  | 263,3   | 2835,06 | 5444,66   |
| Bombas de Circulación                | Cantidad de averías   | 0        | 0       | 2       | 4       | 0       | 0       | 5       | 0       | 0       | 0      | 0       | 0       | 7       | 18        |
|                                      | Horas                 | 0        | 0       | 1,02    | 45,37   | 0       | 0       | 36,67   | 0       | 0       | 0      | 0       | 0       | 79,24   | 162,3     |
|                                      | Megawats              | 0        | 0       | 83,16   | 3541,16 | 0       | 0       | 3342,04 | 0       | 0       | 0      | 0       | 0       | 6204,72 | 13171,08  |
| Bombas de Enfriamiento               | Cantidad de averías   | 0        | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 0      | 0       | 0       | 0       | 0         |
|                                      | Horas                 | 0        | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 0      | 0       | 0       | 0       | 0         |
|                                      | Megawats              | 0        | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 0      | 0       | 0       | 0       | 0         |
| Bombas de Drenaje                    | Cantidad de averías   | 0        | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 0      | 0       | 0       | 0       | 0         |
|                                      | Horas                 | 0        | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 0      | 0       | 0       | 0       | 0         |
|                                      | Megawats              | 0        | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 0      | 0       | 0       | 0       | 0         |
| Total por años                       | Cantidad de averías   | 43       | 46      | 26      | 30      | 25      | 6       | 21      | 13      | 6       | 12     | 9       | 4       | 69      | 310       |
|                                      | Horas                 | 175,02   | 244,59  | 178,73  | 153,08  | 107,89  | 74,35   | 112,29  | 84,47   | 24,18   | 15,82  | 45,39   | 17,3    | 1048,06 | 2281,17   |
|                                      | Megawats              | 17264,83 | 14527,3 | 25338,5 | 13559,7 | 9169,3  | 7077,9  | 14120   | 9361,22 | 3609,04 | 1206,5 | 2869,36 | 1167,25 | 54023,2 | 173294,16 |

**Anexo A.10.** Historial de defectos de los equipos rotatorios durante el período 2010 al 2022.

**Tabla A.10.1.** Historial de defectos de los VTF y VRG durante el período 2010 – 2022. **Fuente:** CTE “Carlos Manuel de Céspedes”.

| <b>EQUIPOS CON DESVIACIÓN DETECTADAS Y QUE YA FUERON REPARADOS Período 2010 - 2022</b> |                                                                        |                                                                                                      |
|----------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>No.</b>                                                                             | <b>Nombre de los Equipos con Desviación Notable (DN) de Parámetros</b> | <b>Observaciones (acciones ejecutada y estado en que se incorporo el equipo)</b>                     |
| <b>1</b>                                                                               | Ventilador Tiro Forzado 3A                                             | Vibraciones en ventilador, reparación de compuerta de succión, stado actual bien                     |
| <b>2</b>                                                                               | Ventilador Tiro Forzado 3A                                             | Mtto general al sistema de regulación, corrección del estado vibracional. estado actual bien         |
| <b>3</b>                                                                               | Ventilador Tiro Forzado 3B                                             | Mtto general al sistema de regulación, corrección del estado vibracional. estado actual bien         |
| <b>4</b>                                                                               | <b>Ventilador Tiro Forzado 4 A</b>                                     | Alta temperatura en CH2 Motor lado Coopling, se reajusta la cantidad de grasa.                       |
| <b>5</b>                                                                               | <b>VTF 3 A</b>                                                         | Vibraciones trancientes producto de agua en el ventilador                                            |
| <b>6</b>                                                                               | <b>VTF 3B</b>                                                          | Vibraciones desbalance con altas vibracines producto de agua en el ventilador, reparación ch3 y ch4. |
| <b>7</b>                                                                               | <b>Ventilador de Tiro Forzado 3A</b>                                   | mantenimiento General revisión de ch3 y ch4 oK                                                       |
| <b>8</b>                                                                               | <b>Ventilador de Tiro Forzado 3B</b>                                   | mantenimiento General revisión de ch3 y ch4 oK                                                       |
| <b>9</b>                                                                               | Sensor Ch 4 del VTF 4A                                                 | Se verifico el sensor y se repararón                                                                 |
| <b>10</b>                                                                              | Ventilador Recirc. de Gases 3                                          | Bajo aislamiento, se realiza una limpieza en aisladores OK                                           |
| <b>11</b>                                                                              | Ventilador Recirc. Gases 3                                             | Defectos en los sensores, resuelto OK                                                                |
| <b>12</b>                                                                              | Ventilador Tiro Forzado 4B                                             | Se balanceo en dos plaanos el estado actual es bueno                                                 |
| <b>13</b>                                                                              | Ventilador tiro forzado 3A                                             | Se realiza un balance, estado final satisfactorio                                                    |
| <b>14</b>                                                                              | <b>VRG 3</b>                                                           | Desbalance mecánico, funcionado OK                                                                   |

**Tabla A.10.1.** Historial de defectos de los VTF y VRG durante el período 2010 – 2022. **Fuente:** CTE “Carlos Manuel de Céspedes”. **(Continuación).**

| <b>EQUIPOS CON DESVIACIÓN DETECTADAS Y QUE YA FUERON REPARADOS Período 2010 - 2022</b> |                                                                        |                                                                                                   |
|----------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>No.</b>                                                                             | <b>Nombre de los Equipos con Desviación Notable (DN) de Parámetros</b> | <b>Observaciones (acciones ejecutada y estado en que se incorporo el equipo)</b>                  |
| <b>15</b>                                                                              | Ventilador tiro forzado 3B                                             | Desbalance mecánico, funcionado OK                                                                |
|                                                                                        | Ventilador tiro forzado 3A                                             | Desbalance mecánico, funcionado OK                                                                |
| <b>17</b>                                                                              | VRG 3                                                                  | Desbalance mecánico, funcionado OK                                                                |
| <b>18</b>                                                                              | Ventilador tiro forzado 3B                                             | Desbalance mecánico, funcionado OK                                                                |
| <b>19</b>                                                                              | Vent. Tiro Forzado 3A Motor                                            | Problemas con el sensor de vibraciones, reparado                                                  |
| <b>20</b>                                                                              | Ventilador Tiro Forzado 3A                                             | Se repararon las paletas de la compuerta de succión                                               |
| <b>21</b>                                                                              | Motor del Ventilador Tiro Forz 3A                                      | Ruido en zona de Ch2 motor lado libre                                                             |
| <b>22</b>                                                                              | Ventilador de tiro forzado III A                                       | Vibraciones en chumacera 3 y 4 Defectos provocados por la lluvia                                  |
| <b>23</b>                                                                              | Ventilador Tiro Forzado III B                                          | Vibraciones en chumacera 3 y 4 Defectos provocados por la lluvia                                  |
| <b>24</b>                                                                              | Ventilador Tiro Forzado 3A                                             | Vibraciones altas con respecto a los valores históricos, seguimiento (Mto Parcial Unidad III)     |
| <b>25</b>                                                                              | Ventilador Tiro Forzado 3A                                             | Se reajusta el sensor                                                                             |
| <b>26</b>                                                                              | Ventilador Recir de Gases 3                                            | Vibraciones transcientes, entrada de agua por salidero de caldera durante el arranque             |
| <b>27</b>                                                                              | Ventilador Tiro forzado 3A                                             | Salidero aceite por el coopling, Defecto en tapon                                                 |
| <b>28</b>                                                                              | Ventilador Tiro Forzado 3B                                             | Vibraciones transcientes, flexiones locales producidas por temperaturas durante el lavado del CAR |
| <b>29</b>                                                                              | Ventilador Tiro Forzado 3A                                             | Se montaron 5 paletas de succión, desprendidas                                                    |
| <b>30</b>                                                                              | Ventilador Tiro Forzado 4B Motor                                       | Presento ruidos en rodamientos, se varia el ciclo de engrase, y esta en perfectas considiones     |

**Tabla A.10.1.** Historial de defectos de los VTF y VRG durante el período 2010 – 2022. **Fuente:** CTE “Carlos Manuel de Céspedes”. **(Continuación).**

| EQUIPOS CON DESVIACIÓN DETECTADAS Y QUE YA FUERON REPARADOS Período 2010 - 2022 |                                                                 |                                                                                                                        |
|---------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| No.                                                                             | Nombre de los Equipos con Desviación Notable (DN) de Parámetros | Observaciones (acciones ejecutada y estado en que se incorpore el equipo)                                              |
| 31                                                                              | Ventilador Recirculador Gases 3                                 | Carencia de grasa, reparado en Mto en Mto.                                                                             |
| 32                                                                              | Ventilador Tiro Forzado 4A                                      | Problemas de alineamiento Tornillos de anclaje base del motor con defectos.( 1 partido)                                |
| 33                                                                              | Ventilador recirculador de Gases 3                              | Ruido en rodamientos del motor                                                                                         |
| 34                                                                              | ventilador Tiro Forzado 3B                                      | Vibraciones por Turbulencia                                                                                            |
| 35                                                                              | Ventilador recirculador de Gases 3                              | Ruido en rodamientos del motor, pasa a mto, cambios.                                                                   |
| 36                                                                              | Vent. Tiro forzado 3A                                           | Desbalances mecanicos y efectos de turbulencia Tupiciones en los CAR, se da mto general                                |
| 37                                                                              | Vent. Tiro forzado 3B                                           | Desbalances mecanicos y efectos de turbulencia Tupiciones en los CAR, se da mto general                                |
| 38                                                                              | Ventilador Tiro Forzado 3A                                      | Defectos en chumacera CH 4, calibración del sensor                                                                     |
| 39                                                                              | Ventilador Tiro Forzado 3B                                      | Desbalance mecánico, balanceado en el Mto                                                                              |
| 40                                                                              | Chumera 3 VTF 3A                                                | Problemas con el sensor, se calibra el sensor                                                                          |
| 41                                                                              | Chumera 3 y 4 VTF 3A                                            | Altas vibraciones en ch3 y ch4, se da un mantenimiento general, y se realiza un balance                                |
| 42                                                                              | VRG 3                                                           | Mediciones periodicas, ruido en rodamiento Ch1,Se reajusta el proceso de lubricación y se logro una reducción de ruido |
| 43                                                                              | Ventilador Tiro Forzado 3A                                      | Vibraciones CH3 y CH4, se da mantenimiento y se balacea                                                                |
| 44                                                                              | Ventilador Tiro Forzado 3A                                      | Defectos en sensor CH3, se repara                                                                                      |
| 45                                                                              | VRG 4                                                           | Ruido en rodamientos CH1 y CH2, se cambiaron ambos                                                                     |

**Tabla A.10.1.** Historial de defectos de los VTF y VRG durante el período 2010 – 2022. **Fuente:** CTE “Carlos Manuel de Céspedes”. **(Continuación).**

| EQUIPOS CON DESVIACIÓN DETECTADAS Y QUE YA FUERON REPARADOS Período 2010 - 2022 |                                                                 |                                                                                            |
|---------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|
| No.                                                                             | Nombre de los Equipos con Desviación Notable (DN) de Parámetros | Observaciones (acciones ejecutada y estado en que se incorporo el equipo)                  |
| 46                                                                              | Ventilador Tiro Forzado 3A                                      | Altas vibraciones ch3 y ch4                                                                |
| 47                                                                              | VTF 3B                                                          | Altas Vibraciones desbalance mecánico, se balancea el ventilador.                          |
| 48                                                                              | VTF 3A                                                          | Altas vibraciones desbalance soldadura de paleta compuerta Succ, se balancea dinamicamente |
| 49                                                                              | VTF 3B                                                          | Altas vibraciones desbalance soldadura de paleta compuerta Succ, se balancea dinamicamente |

**Tabla A.10.2.** Historial de defectos de las Bombas de Agua de Alimentar durante el período 2010 – 2022. **Fuente:** CTE “Carlos Manuel de Céspedes”.

| No. | Nombre de los Equipos con Desviación Notable (DN) de Parámetros | Observaciones (acciones ejecutada y estado en que se incorporo el equipo)                                                        |
|-----|-----------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1   | B.A.A 4C                                                        | Mtto motor alta temperatura, buen estado actual                                                                                  |
| 2   | Bomba Agua alimentar 4A                                         | Correcciones en alineamiento y cambios de grasa en coopling, estado actual en seguimiento por Vibración                          |
| 3   | Bomba Agua Alimentar 4A                                         | Corrección del juego axial del coopling, se da seguimiento a las vibraciones.                                                    |
| 4   | Bomba Agua Alimentar 4B                                         | Corección al sellaje del TQ del sistema de aceite, en buenas condicione, se mantiene la observacion a la contaminación por agua. |
| 5   | B.A.A 3A                                                        | Corección al sellaje del TQ del sistema de aceite, en buenas condicione, se mantiene la observacion a la contaminación por agua. |
| 6   | B.A.A 3B                                                        | Corección al sellaje del TQ del sistema de aceite, en buenas condicione, se mantiene la observacion a la contaminación por agua. |
| 7   | B.A.A 3C                                                        | Corección al sellaje del TQ del sistema de aceite, en buenas condicione, se mantiene la observacion a la contaminación por agua. |
| 8   | B.A.A 4A                                                        | Mtto general eje partido , estado actual bueno                                                                                   |
| 9   | B.A.A 4C                                                        | Se da seguimiento al estado del aceite lubricante, bajo flujo en el bombeo.                                                      |
| 10  | B.A.A 3A Auxiliar Aciete                                        | Se ajusta la recirculación de la bomba                                                                                           |
| 11  | B.A.A 3A                                                        | Se monto un motor viejo de respuesto en el mantenimiento                                                                         |
| 12  | Bomba Agua Alientar 3A                                          | Se ajusto al cantidad de lubricantes en coopling                                                                                 |
| 13  | Motor Bomba Agua Alim. 3A                                       | Defectos exceso de apriete de tapa de chumacera, se corrige el defecto.                                                          |

**Tabla A.10.2.** Historial de defectos de las Bombas de Agua de Alimentar durante el período 2010 – 2022. **Fuente:** CTE “Carlos Manuel de Céspedes”.  
(Continuación).

| No. | Nombre de los Equipos con Desviación Notable (DN) de Parámetros | Observaciones (acciones ejecutada y estado en que se incorporo el equipo)                                                                                                                                        |
|-----|-----------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 14  | Bomba Agua Alimentar 4A                                         | Se realiza un cambio del disco de balance y buje del disco de balance, se revisa completamente la bomba. Mtto parcial.                                                                                           |
| 15  | Bomba Agua Alimentar 3C                                         | Se repara la chumacera 4 y centra la bomba, aparenta flexión en eje, bajo seguimiento                                                                                                                            |
| 16  | Bomba Agua Alimentar 4A                                         | Se repara la bomba, funciona bien en la actualidad.                                                                                                                                                              |
| 17  | Bomba Agua Alimentar 3A                                         | Se reparó mantenimiento general su funcionamiento es bueno                                                                                                                                                       |
| 18  | Bomba Agua Alimentar 3C                                         | mantenimiento General a la bomba OK                                                                                                                                                                              |
| 19  | Bomba Agua Alimentar 4A                                         | mantenimiento General, esta a prueba, se reajustan chumaceras                                                                                                                                                    |
| 20  | Bomba Agua Alimentar 3C                                         | Vibraciones en ch3 y ch4                                                                                                                                                                                         |
| 21  | Bomba Agua Alimentar 4A                                         | mantenimiento General, trabajo en buenas condiciones                                                                                                                                                             |
| 22  | Bomba Agua Alimentar 3A                                         | Se realiza un Mtto General                                                                                                                                                                                       |
| 23  | Bomba Agua Alimentar 4B                                         | Mantenimiento centramiento de la bomba y se cambiaron los sellos del disco de balance.                                                                                                                           |
| 24  | Bomba Agua Enfriamiento 4A                                      | Se realiza un análisis técnico, teniendo en cuenta el comportamiento y la tendencia, se decide que el equipo continuara trabajando en estas condiciones ya que no es posible mejorar sus condiciones de trabajo. |
| 25  | Bomba Agua Alimentar 4A                                         | SE han logrado estabilizar las temperaturas de trabajo de la chumacera en un limite admisible de trabajo 68 oC                                                                                                   |

**Tabla A.10.2.** Historial de defectos de las Bombas de Agua de Alimentar durante el período 2010 – 2022. **Fuente:** CTE “Carlos Manuel de Céspedes”.  
(Continuación).

| No. | Nombre de los Equipos con Desviación Notable (DN) de Parámetros | Observaciones (acciones ejecutada y estado en que se incorporo el equipo)                                                                                                        |
|-----|-----------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 26  | Bomba Agua Alimntar 4A                                          | Se reviso la chumacera y corrigieron defectos, esta trabajando a una temperatura estable.                                                                                        |
| 27  | Bomba Agua Alimentar 3C                                         | Vibraciones en ch3, 4, ch5, se dio mtto general Estado admisible                                                                                                                 |
| 28  | Bomba Agua Alimentar 3C                                         | Se realiza un análisis de vibraciones, a partir del seguimiento y tendencia, se determina mantener la bomba trabajando con esos niveles de vibraciones, considerados aceptables. |
| 29  | Bomba Agua Alimentar 3C                                         | Defectos temperatura en Ch2 motor lado libre, se repara y se corrige el cooping, queda Satisfactoria.                                                                            |
| 30  | Bomba Agua Alimentar 4A                                         | Alta temperatura en ch2 Motor lado cooping                                                                                                                                       |
| 31  | Bomba Agua Alimentar 3A                                         | Se reviso el motor se rueda en vacio, aparenta un defecto con el sensor de la ch4. la bomba esta en servicio trabajando oK                                                       |
| 32  | Bomba Agua Alimentar 3C                                         | Se realiza un cambio de chumacera por una de respuesto.                                                                                                                          |
| 33  | Bomba Agua Alimentar 4B                                         | Se cambiaron los tacones de empuje                                                                                                                                               |
| 34  | Bomba Agua Alimentar 3A                                         | Se revisa el sistema aparenta fueron problemas transitorio del sistema de bombeo.                                                                                                |
| 35  | Bamba agua alimentar 3A                                         | Salidero por disco de balance y revisión de Ch2 Motor                                                                                                                            |
| 36  | Bomba Agua alimentar 3C                                         | Vibraciones en CH4, Se reparo defectos de linealidad por roces en la ch2 lado cooping.                                                                                           |
| 37  | Bomba Agua alimentar 3C                                         | Vibraciones en ch2 Dirección vertical lado cooping motor, se repara la chumacera roce en la mitad inferior                                                                       |

**Tabla A.10.2.** Historial de defectos de las Bombas de Agua de Alimentar durante el período 2010 – 2022. **Fuente:** CTE “Carlos Manuel de Céspedes”.  
(Continuación).

| No. | Nombre de los Equipos con Desviación Notable (DN) de Parámetros | Observaciones (acciones ejecutada y estado en que se incorpore el equipo)                                                                 |
|-----|-----------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 38  | Bomba Agua Alimentar 4C                                         | Se reajusta la chumacera 2 por roces axiales                                                                                              |
| 39  | Motor Bomba Agua Alimentar 4C                                   | Alta temperatura en ch2, problemas con el juego axial del coopling semirigido, se reparo el juego axial. oK                               |
| 40  | Bomba Agua alimentar 4C                                         | Alta temperatura en chumacera 2 motor LL                                                                                                  |
| 41  | Bomba Agua alimentar 3C                                         | Defectos en sensor ch4 vibraciones                                                                                                        |
| 42  | Bomba Agua alimentar 4C                                         | Alta temperatura en chumacera 2 motor LL, defectos en el coopling                                                                         |
| 43  | Celula de BAA de respuesto                                      | Defectos de soldaduras                                                                                                                    |
| 44  | Eje de BAA 3B                                                   | Defectos de soldaduras                                                                                                                    |
| 45  | B. Agua Alimentar 4B                                            | Problemas en chumaceras arrastre de metal, problemas con la lubricación, reaparición de las 4 chumaceras y limpieza del sistema de aceite |
| 46  | Bomba Agua Alimentar 4B                                         | Alta temperatura en Fase A, B, yC del motor, montaje defectuoso del ventilador de aire enfriamiento.                                      |
| 47  | B. Agua Alimentar 3C                                            | Desalineamiento y desbalance .                                                                                                            |
| 48  | Bomba Agua alimentar 3B                                         | Se da Mtto general                                                                                                                        |
| 49  | Motor Bomba Agua Alimentar 3C                                   | Vibraciones CH2 del motor, se repara la chumacera                                                                                         |

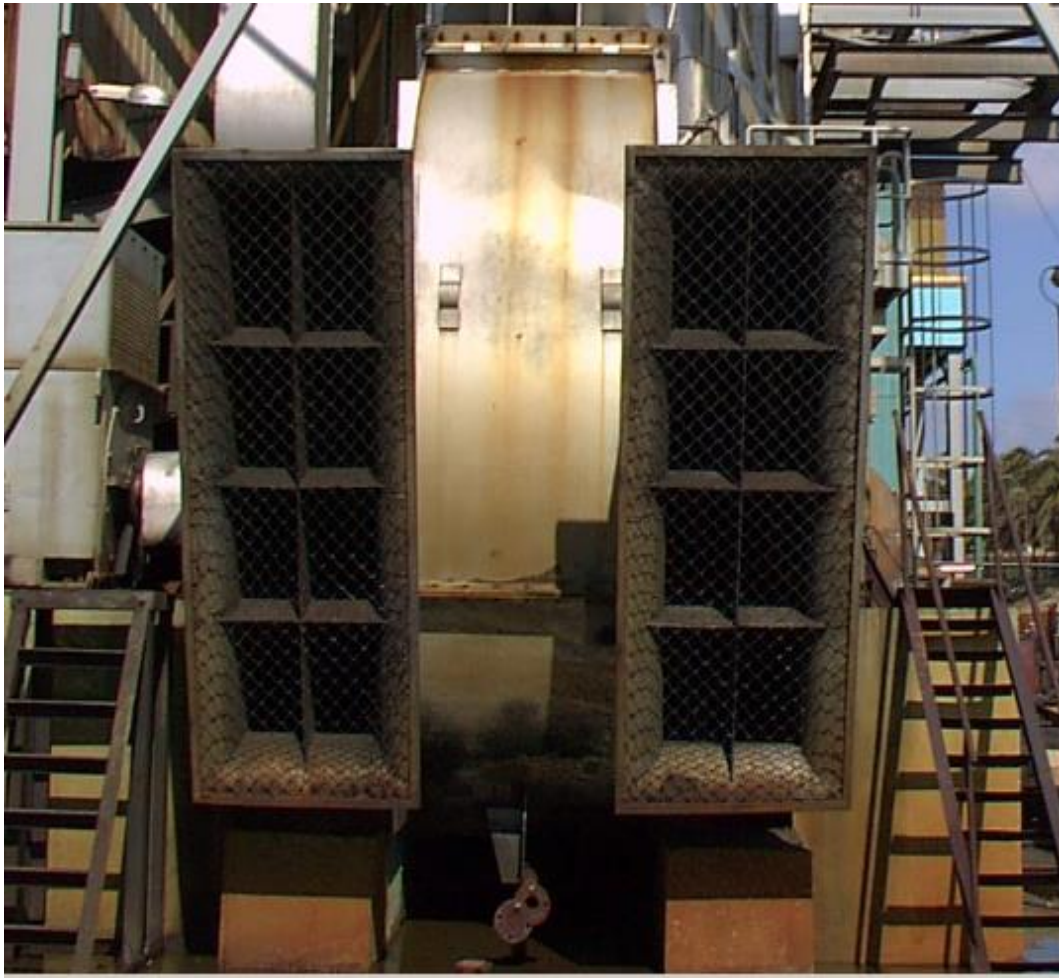
**Tabla A.10.2.** Historial de defectos de las Bombas de Agua de Alimentar durante el período 2010 – 2022. **Fuente:** CTE “Carlos Manuel de Céspedes”.  
(Continuación).

| No. | Nombre de los Equipos con Desviación Notable (DN) de Parámetros | Observaciones (acciones ejecutada y estado en que se incorporo el equipo)                                                            |
|-----|-----------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 50  | Bomba Agua Alimentar 3A                                         | Se repara la ch2, defectos en metal babit, se sustituye por otra de respuesto                                                        |
| 51  | Bomba Agua Alimentar 3C                                         | Se repara la ch3, defectos en los sellos disco balance lado ch3 y ch4                                                                |
| 52  | Bomba Agua Alimentar 4A                                         | Eje patido lado CH4.                                                                                                                 |
| 53  | Bomba Agua Alimentar 4A                                         | Se realiza un Mto General cambio de eje y piezas con con defectso quedo OK.                                                          |
| 54  | Bomba Agua Alimientar 3B                                        | Causa instantanea alto amperaje, y defectos en chumacera 3 de la bomba, se repara la ch3 y se elimina la condición de alto amperaje. |
| 55  | Bomba Agua Alimentar 3C                                         | Defectos en filtros de succión, se limpia el filtro.                                                                                 |
| 56  | Bomba Agua Alimentar 3A                                         | Se realizo un cambio de Sellos, se evita la entrada de agua en el aceite.                                                            |
| 57  | Bomba Agua Alimentar 3A                                         | Reparación y montaje de sistema de sellaje reparado                                                                                  |
| 58  | Bomba Agua Alimentar 3A                                         | S e repara el sello del disco de balance                                                                                             |
| 59  | Bomba Agua Alimentar 3A                                         | Se realizaron cambios de sistema de sellaje en el Mto                                                                                |
| 60  | Bomba Agua Alimentar 3B                                         | Altas temperatura CH3, Error de medición del sensor                                                                                  |
| 61  | Bomba Agua Alimentar 4B                                         | Salidero por sistema de sellaje, se repara en el mto general de la unidad.                                                           |

**Tabla A.10.2.** Historial de defectos de las Bombas de Agua de Alimentar durante el período 2010 – 2022. **Fuente:** CTE “Carlos Manuel de Céspedes”.  
(Continuación).

| No. | Nombre de los Equipos con Desviación Notable (DN) de Parámetros | Observaciones (acciones ejecutada y estado en que se incorporo el equipo)                              |
|-----|-----------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 62  | Bomba Agua Alimentar 4A                                         | Se repara con un Mtto Capital                                                                          |
| 63  | Bomba Agua Alimentar 4B                                         | Salidero por disco de balance, se contamina el aceite con agua                                         |
| 64  | Bomba de Agua Alimentar 4B                                      | Problemas con el sistema de sellaje, agua en el aceite                                                 |
| 65  | BAA 3C                                                          | Problemas de centramiernto                                                                             |
| 66  | BAA 3B                                                          | Se destruyen los tacones de empuje axial de trabajo                                                    |
| 67  | BAA 4C                                                          | Vibraciones CH3 Bomba lado cooupling, Mtto general                                                     |
| 68  | Bomba Agua Alimentar 3A                                         | Montaje de motor nuevo, Vibraciones y alta temperatura Ch2, se ajusta en centro magnético al cooupling |
| 69  | Bomba Agua Alimentar 3A                                         | Roce axial del cooupling, altas vibraciones                                                            |
| 70  | Bomba Agua Alimentar 3A                                         | Roce axial del cooupling, altas vibraciones                                                            |
| 71  | Bomba Agua A limentar 3A                                        | Rose axial de la ch2, se fue el juego axial de la bomba.                                               |
| 72  | Bomba Agua alimentar 4C                                         | Alta temperatura CH2 Motor                                                                             |
| 73  | Bomba Agua Alimentar 3B                                         | Tuberia del flujometro tupida, bajo flujo de aceite                                                    |
| 74  | Bomba Agua Alimentar 4A                                         | Alta temperatura CH2 motor                                                                             |
| 75  | Bomba Agua Alimentar 4C                                         | Rotura en chumaceras 3 y CH 4, temperatura                                                             |

**ANEXO A.11.** Ventilador de Tiro Forzado 4 A (VTF). **Fuente:** Elaboración propia.



Categoría B (1100 kW)  
Equipo de Flujo Radial  
(Doble succión)  
Velocidad – 1180 RPM  
Capacidad – 4890 m<sup>3</sup>/s  
Presenta 4 chumaceras radiales  
Peso del ventilador – 2570 Kg  
Radio del ventilador – 1070 mm  
Peso del rotor del motor – 2000 Kg  
Radio del rotor del motor – 700 mm  
Aspas del ventilador - 10