



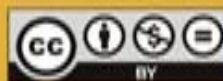
Uptc

Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia



El Mantenimiento General Administración de Empresas

Este material de autoestudio fue creado en el año 2006 para la asignatura Administración de Empresas del programa Ingeniería Electromecánica y ha sido autorizada su publicación por el (los) autor (es), en el Banco de Objetos Institucional de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.



Oliverio García Palencia
oligar52@yahoo.com

1. EL MANTENIMIENTO GENERAL

1.1 COMENTARIOS GENERALES

El mantenimiento puede considerarse tan antiguo como la existencia del hombre. Por relatos históricos sabemos que el hombre desde sus principios practicaba el mantenimiento, hasta de sus utensilios más primitivos, aunque no en forma lógica y ordenada, sino forzado por las necesidades básicas para su supervivencia, utilizando cada día medios más efectivos para conseguir sus fines.

Posteriormente con el comienzo del presente siglo se inició la etapa de realización del mantenimiento correctivo y la creación de los primeros talleres, que vino a tomar importancia relevante durante la Segunda Guerra Mundial en la industria militar, donde se vio la necesidad de implantar técnicas con el fin de prevenir las fallas de los equipos en acción; después de lo cual se estableció el mantenimiento en la industria como una actividad paralela a la producción y al control de calidad.

La conclusión que el mantenimiento debía ser necesario nació de observar que todo equipo sufre por una gran diversidad de causas deterioro o desgaste que es fundamentalmente de tres tipos:

- **Normal:** Debido a causas como la presión, movimiento o velocidad de operación, corrosión, fatiga, temperatura, vibraciones, etc.
- **Anormal:** Debido a descuido, golpes, sobrecarga de trabajo o mala operación.
- **Accidental:** Debido a causas incontrolables, naturales o meteorológicas u otras improgramables que se conocen como accidentes.

Con la implantación del mantenimiento el deterioro no se detiene, sino solamente se retarda, en mayor o menor grado según la calidad y efectividad del mismo.

En la actualidad muchas compañías en el mundo están perdiendo millones de pesos por no producir sus plantas a óptima capacidad, básicamente por no contar con un programa de mantenimiento efectivo que disminuya los paros improductivos debidos a fallas imprevistas. Esto se debe a que el mantenimiento recibe con frecuencia muy poca atención y se le tiene como un recurso para cubrir emergencias e imprevistos, llegándose a considerar una carga para producción; e inclusive a definirlo como "El mal necesario de la planta que debe ser tolerado". A esta actitud

asumida por ciertas directivas, se les une la adoptada por los Ingenieros de Mantenimiento en limitar sus actividades profesionales solo al desarrollo técnico y ser pasivos ante el degradamiento de sus funciones dentro de la empresa. La falta de complementación de la técnica con la aplicación de recursos de tipo administrativo conlleva a los jefes de mantenimiento a una dependencia acentuada de los puntos de vista, actividades y programas de otros departamentos de la empresa, como Producción, Ingeniería, Técnico, Compras y Relaciones Industriales.

Por tanto se requiere de un plan de mantenimiento óptimo que abarque los campos de organización y administración, que optimice los factores disponibles y que pueda ser aceptado y adoptado por todos.

La base para crear e implementar este plan debe ser la moderna ideología del mantenimiento que no solo previene los paros de producción, sino también que coopera al incremento de las utilidades, mediante programas de reducción de costos (consumo de energéticos), aumento de la calidad del producto, y en general mejorando la productividad de la planta. Los buenos resultados de efectividad del plan requieren además de los recursos y técnicas adecuadas, del apoyo y facilidades de producción, para que el mantenimiento sea dirigido con sentido gerencial amplio, es decir, se debe hacer un cambio de concepción centralizada por una integrada y lograr de esta manera la conformación de grupos interdisciplinarios que trabajen con el enfoque del sistema como un todo.

En aquellas plantas que no cuentan con un plan de mantenimiento adecuado, la proporción del mantenimiento de emergencia contra el mantenimiento planeado guarda aproximadamente, la relación 80/20 o sea 80% de emergencia y 20% de planeado; el propósito del Departamento de Mantenimiento con la creación de un plan, será hacer el cambio en forma paulatina hasta lograr invertir la relación dada.

1.2 DEFINICIÓN Y OBJETIVOS

Mantenimiento son todas las actividades que deben ser desarrolladas en orden lógico, con el propósito de conservar en condiciones de funcionamiento seguro, eficiente y económico los equipos de producción, herramientas y demás propiedades físicas de las diferentes instalaciones de una empresa.

A medida que transcurre el desarrollo tecnológico las instalaciones industriales se vuelven cada vez más complejas y automáticas con grandes cadenas de producción, cuya parálisis representa grandes pérdidas económicas. La importancia del mantenimiento se deriva por tanto, de la necesidad de contar con una organización que permita restablecer rápidamente las condiciones de operación para reducir al mínimo las pérdidas de producción.

Desde el punto de vista de la administración del mantenimiento su principal fin es la conservación del servicio. Esto es, la máquina recibe mantenimiento para garantizar que la función que desempeña dentro del proceso productivo se cumpla a cabalidad. En términos económicos un eficiente mantenimiento significa [37]:

- **La protección y conservación de las inversiones**
- **La garantía de productividad**
- **La seguridad de un servicio.**

Se debe aceptar que el mantenimiento adecuado de los equipos es costoso, pero que más costoso aún es dejar de mantenerlos ya que sin mantenimiento no es posible producir.

De todo lo anterior se puede deducir que el objetivo general del mantenimiento es:

"Conservar en condiciones deseadas de operación los componentes del sistema productivo, con el mejor rendimiento posible y con costos compatibles".

Este postulado que básicamente incluye como aspectos constitutivos el técnico y el económico, se puede para su mejor comprensión subdividir en tres puntos claramente delimitados que constituyen los objetivos fundamentales del mantenimiento y son:

- Mantener las instalaciones y equipos en buenas condiciones operacionales.
- Sostener lo más bajo posible los costos de producción.
- Mantener los equipos productivos operando seguramente, durante un porcentaje óptimo de tiempo.

La meta no debe ser la conservación propiamente dicha, sino el coincidir con las demás actividades de la empresa en la obtención de las más altas capacidades de producción, es decir dirigir su función en la obtención del modelo óptimo de mantenimiento para cada componente del sistema a un costo mínimo.

Para lograr lo anterior, todo plan que busque el mejoramiento de la función de mantenimiento debe contener [24]:

- Establecimiento de objetivos
- Aplicación de fundamentos administrativos
- Sistemas de planeación y control
- Programas de mantenimiento concretos y efectivos
- Adecuado suministro de materiales y repuestos
- Apropiado control de costos y presupuestos, y

- Un sistema informativo sencillo y objetivo.

Se debe finalmente, considerar como objetivo de especial importancia, el hecho de crear dentro de todas las áreas de la empresa la conciencia de los beneficios del mantenimiento, no solo en la prolongación de la vida útil de todos los equipos y en la mejora de la calidad de los productos sino también en el aumento determinante de la seguridad de los operarios, que se debe tener como uno de los parámetros primordiales al medir la efectividad del sistema.

1.3 LA INGENIERÍA DE MANTENIMIENTO

La Ingeniería de Mantenimiento se encuentra ubicada dentro del concepto general de la ingeniería, o más específicamente de la Ingeniería de fábricas que se define como aquella rama del conocimiento que se relaciona con la explotación, desarrollo y transformación de los Recursos Naturales para ponerlos al servicio del hombre mediante un proceso de producción.

La ingeniería de fábricas se puede dividir en seis clases de ingeniería interrelacionadas en mayor o menor grado, estas son [37]:

1.3.1 Ingeniería de Investigación

Comprende las etapas de búsqueda de materiales, herramientas, procedimientos y técnicas que mejoren los sistemas productivos al servicio del hombre.

1.3.2 Ingeniería de Desarrollo

Aplica los resultados de la investigación en la exploración de los Recursos Naturales.

1.3.3 Ingeniería de Diseño

Desarrolla nuevos procesos y los transfiere a planos completos con sus especificaciones, para la fabricación de equipos y construcción de plantas y edificios.

1.3.4 Ingeniería de Construcción

Construye los edificios e instala los equipos con sus servicios necesarios, con base en los planes elaborados por la Ingeniería de Diseño.

1.3.5 Ingeniería de Producción

Opera los equipos instalados para obtener los mejores rendimientos de producción con base a los procesos establecidos.

1.3.6 Ingeniería de Mantenimiento

Mantiene en las mejores condiciones de operación los equipos y resuelve los problemas de conservación de la planta física.

Con base en lo anterior se puede definir la Ingeniería de Mantenimiento como la labor de administrar y desarrollar los programas de mantenimiento de los equipos, herramientas o edificios de las diferentes instalaciones de una fábrica.

Modernamente se conoce la Ingeniería de Mantenimiento como Terotecología que se deriva de la palabra griega Teros-Tereo que significa, cuidar, guardar, revisar.

Entre los principales objetivos específicos de la Ingeniería de Mantenimiento, manejados con criterio económico y encausados a obtener reducción en los costos de producción, se pueden enumerar los siguientes:

- Mantener permanentemente los equipos e instalaciones en su mejor estado, para evitar tiempos de parada improductivos.
- Prolongar la vida útil del equipo y maquinaria el máximo tiempo, con funcionamiento eficiente.
- Efectuar las operaciones de emergencia, tan pronto y eficazmente como sea posible.
- Sugerir y proyectar mejoras en los equipos para disminuir las posibilidades de falla.
- Llevar a cabo las inspecciones sistemáticas de la fábrica con los suficientes intervalos de control, manteniendo los registros adecuados.
- Controlar el costo directo del mantenimiento, mediante el correcto y efectivo uso del tiempo, materiales, servicios y servicios humanos.

1.4 ACTIVIDADES DE INGENIERÍA DE MANTENIMIENTO

Las principales actividades ejecutadas dentro de la ingeniería de mantenimiento son las siguientes:

1.4.1 Inspección

Actividad consistente en efectuar análisis del funcionamiento y operación de los equipos, con el fin de determinar su estado físico y las posibilidades de falla. Las inspecciones pueden ser:

- **Ligera:** Se realiza en forma superficial con poca instrumentación.
- **Profunda:** Requiere de instrumentación y herramienta compleja.
- **Abierta:** El equipo se debe abrir o desmontar para realizar inspecciones internas.
- **Cerrada:** No es necesario abrir o desarmar el equipo, se usa generalmente equipo de diagnóstico.

1.4.2 Servicio

Actividades que se realizan con el fin de mantener la apariencia y las propiedades físicas de los equipos e instalaciones y que son necesarios para la supervivencia de los equipos. Las actividades más comunes de servicio son las de:

- Limpieza
- Pintura
- Desinfección
- Desoxidación.

1.4.3 Reparación

Actividades generales consistentes en corregir defectos, sustituir partes o piezas de equipos que han fallado, para que vuelvan a funcionar eficientemente. Las reparaciones son fundamentalmente de dos tipos:

- **Reparación mayor:** Requiere gran cantidad de mano de obra y materiales.
- **Reparación menor:** Se realiza en poco tiempo, con poca herramental.

1.4.4 Modificación

Actividades consistentes en alterar el diseño de los equipos e instalaciones, para simplificar la operación y el mantenimiento o para satisfacer las necesidades de producción. Las modificaciones pueden ser:

- **De simplificación:** Para lograr operación más eficiente o mantenimiento simplificado con disminución de costos.
- **De adaptación:** Con la finalidad de aumentar las cantidades de producción, o por cambio del producto.
- **Por necesidad:** Debidas a obsolescencia de los equipos o a la dificultad para obtener reemplazos y repuestos. De las modificaciones deben quedar registros para el mantenimiento y que este sea planeado con base al nuevo estado.

1.4.5 Fabricación

Actividad consistente en la manufactura de partes de repuestos, de difícil adquisición o urgente con el fin de reparar, modificar o dar servicios de mantenimiento a equipos o instalaciones.

1.4.6 Montaje

Actividades consistentes en instalar, arrancar y poner en operación normal equipos nuevos, o reconstruidos.

Los montajes tienen como ventaja el adiestramiento que se adquiere por parte del personal, que posteriormente se encarga de operar o mantener estos equipos, pues generalmente estos montajes son dirigidos por técnicos especialistas o los mismos fabricantes.

1.4.7 Cambio

Actividades que implican reemplazo de partes o equipos que han agotado su vida útil y su reparación o recuperación ya no es económica. Las actividades de cambio deben fundamentarse en las necesidades de modernización, o ajuste en las líneas de producción para mejorar la eficiencia, aumentar la capacidad productiva o la calidad del producto.

1.5 EL CICLO PRODUCTIVO

Los elementos básicos componentes de cualquier sistema productivo se muestran en la Figura 1. [34]. Existen tres recursos fundamentales que se interrelacionan por medio de tres procesos, para mediante una sucesión permanente integrar el ciclo productivo. Los tres recursos necesarios son:

- El capital

- Las materias primas
- Los productos terminados.

Los tres procesos a realizar son:

- Compras
- Manufactura
- Ventas.

Mediante el proceso de compras se transforma el capital de explotación en las materias primas y recursos físicos necesarios, los cuales mediante un proceso preestablecido de manufactura y control de calidad, se transforman en unos productos terminados, para satisfacer necesidades de sustento, comodidad, servicio, o utilidad suntuaria, en beneficio del hombre. Estos productos terminados son comercializados apropiadamente mediante un proceso de ventas que tiene como objeto lograr la retribución del capital, y un excedente de utilidades que es el fin último de todo proceso productivo. El capital recuperado por consiguiente se reinvierte en nuevas materias primas para así seguir la rotación antihoraria del proceso cíclico.

Para que el proceso de manufactura sea eficiente, y contribuya a generar utilidades, se requiere de la operación integrada de producción y mantenimiento que permita una alta efectividad y disponibilidad de los equipos productivos.

1.6 CLASIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE MANTENIMIENTO

La existencia de una gran variedad de industrias, de diferentes condiciones, instalaciones, etc. Ha determinado a través del tiempo la necesidad de diferentes prioridades y técnicas para la aplicación del mantenimiento. A continuación se da una clasificación industrial del mantenimiento; con una breve descripción de los criterios técnicos de cada uno de ellos.

1.6.1 Mantenimiento Reparativo

Son las actividades realizadas en los equipos que han fallado con la finalidad de recuperar sus condiciones de funcionamiento normal.

1.6.2 Mantenimiento de Emergencia

Son los trabajos urgentes y costosos que se llevan a cabo en equipos de producción críticos o vitales, con el equipo fuera de servicio, cuya falla ocasiona paralización completa de la producción,

y tienen por objeto la recuperación de la calidad del servicio, de la manera más rápida, eficiente y segura.

1.6.3 Mantenimiento Correctivo

Conjunto de actividades conducentes a la corrección de fallas y anomalías en los equipos a medida que se van presentando y con la maquinaria fuera de servicio.

1.6.4 Mantenimiento Periódico

Consiste en dar el mantenimiento al equipo en forma integral a todo el conjunto simultáneamente, después de un lapso de trabajo de tiempo determinado. El mantenimiento periódico considera que la probabilidad de cambios en las características físicas de los componentes se incrementa a partir de cierto número de horas de trabajo y deberán ser cambiados sin importar su estado.

1.6.5 Mantenimiento Progresivo

Permite proporcionar el mantenimiento al equipo en forma racional y progresiva, por etapas, aprovechando el tiempo en que éste no está prestando servicio, para ello se subdividen las máquinas en secciones, mecanismos y partes.

1.6.6 Mantenimiento Sintomático

Labores enfocadas al arreglo de fallas en función de los síntomas observados en el funcionamiento del equipo (ruidos, temperaturas anormales, consumos, etc.).

1.6.7 Mantenimiento Continuo

Trabajos ejecutados en forma permanente y estable al equipo con un nivel óptimo, siendo estos o no necesarios. Se basa en el concepto de que mientras mejor atendida esté la máquina, su funcionamiento será más eficiente.

1.6.8 Mantenimiento Preventivo

Es el conjunto de actividades que permiten en forma económica, la operación segura y eficiente de un equipo, con tendencia a evitar las fallas imprevistas. Son trabajos programados sistemáticamente con suficiente anticipación.

1.6.9 Mantenimiento Predictivo

Actividades que permiten detectar las fallas por revelación antes que sucedan, usando aparatos de diagnóstico y pruebas no destructivas. Es el sistema de mantenimiento permanente que se realiza durante el funcionamiento de los equipos.

1.6.10 Mantenimiento Mixto

Es la aplicación de labores correctivas y preventivas de cualquier tipo, pero al mismo tiempo, aprovechando la disponibilidad del equipo cuando se encuentra fuera de servicio por una falla imprevista.

1.6.11 Mantenimiento por Over-Haul

Sistema de mantenimiento que se aplica a fábricas que suspenden toda actividad durante un lapso de tiempo determinado, una o dos veces al año; es decir que se realiza una parada general de planta. Estos trabajos requieren grandes cantidades de repuestos y mano de obra.

Básicamente los sistemas antes mencionados se pueden clasificar en dos grandes grupos, comúnmente conocidos que son:

- El Mantenimiento Correctivo
- El Mantenimiento Preventivo.

Al primer grupo corresponden adicionalmente el Mantenimiento de Emergencia y las reparaciones mayores. Al segundo grupo corresponde también, el Mantenimiento Predictivo, el Periódico, el Progresivo, el Sintomático y el Continuo.

En las dos últimas décadas el desarrollo de los métodos para realizar el Mantenimiento Predictivo le ha dado tanta importancia, que su estudio y desarrollo se hace en forma independiente del sistema Preventivo, por lo que se le considera como un nuevo sistema general, o sea que la clasificación actual de los tipos de mantenimiento se aumenta a tres sistemas fundamentales, siendo el predictivo el último de ellos.

Sin embargo, la aplicación de estos tres sistemas de Mantenimiento, perfectamente delimitados deben enmarcarse dentro del contexto global de una adecuada organización de mantenimiento que recibe el nombre genérico de Mantenimiento Dirigido, que es la base de la creación de la moderna teoría administrativa para gerenciar mantenimiento que se denomina actualmente Mantenimiento Productivo Total.

1.7 EL MANTENIMIENTO DIRIGIDO

1.7.1 Fundamentos

El Mantenimiento Dirigido es una suma racional de las actividades o labores ventajosas que se desarrollan en los diferentes sistemas de mantenimiento, visto en forma individual. En este sistema se elabora para cada equipo una orden de trabajo específica en la cual se determinan las labores de mantenimiento que este necesita [15].

Su nombre "Dirigido" se debe a que todos los trabajos que se ejecutan a un equipo, están de antemano comprobados que son necesarios y por lo tanto encausados exclusivamente a donde serán de utilidad.

El "objetivo" fundamental del Mantenimiento Dirigido es la disponibilidad, o sea, el logro de la mayor vida útil segura y eficiente de los equipos.

Para lograr este objetivo se debe seguir una adecuada "estrategia", que debe basarse fundamentalmente en la eficiencia con que se desarrolle las actividades y esta se logra consiguiendo optimizar la relación entre los recursos materiales o insumos y los productos terminados.

Además de la estrategia fundamental, la "política" que se debe seguir en el desarrollo de las actividades debe tener como finalidad la reducción de costos generales es decir, la rentabilidad de los procesos que se traduzcan en una economía real de los costos unitarios de producción. Dado que los presupuestos son limitados permanentemente; es un buen principio de dirección utilizar los recursos económicos sabia y provechosamente.

1.7.2 Etapas de Implementación

Para lograr una adecuada organización de Mantenimiento Dirigido se requiere una serie de etapas entre las que se pueden mencionar:

1.7.2.1 **Clasificación de los Equipos.** Se debe realizar inicialmente según su importancia dentro del proceso productivo, en las tres categorías básicas:

- Máquinas críticas
- Máquinas mayores o semi-críticas
- Máquinas normales o de propósito general.

1.7.2.2 **Estandarización de los Equipos.** Se debe establecer familias de equipos según sus características tecnológicas, métodos de mantenimiento y condiciones particulares de operación. Con el fin de analizar adecuadamente sus elementos comunes.

1.7.2.3 **Clasificación de las Paradas.** Existen tres categorías fundamentales:

- **Parada Mayor.** O sea, aquella que paraliza completamente la producción de una planta o línea de proceso continuo, esta parada puede ser producida por equipos vitales (críticos), equipos prioritarios o equipos principales.
- **Parada Parcial.** O sea, aquella que reduce la producción en cuanto a la cantidad de productos terminados o, a la calidad de los mismos. Esta parada puede ser producida por equipos importantes, semicríticos, no necesariamente prioritarios o algunos equipos mayores.
- **Parada sin Consecuencias.** O sea, aquella que no implica necesariamente pérdidas en la calidad o cantidad de los productos, es decir, no tiene incidencia directa en la producción ya que los equipos pueden ser sustituidos o reparados en lapsos cortos de tiempo; es ocasionada por fallas en equipos normales y menores, sin importancia o que realizan una función secundaria dentro del proceso.

1.7.2.4 **Clasificación de los Programas de Trabajo.** La ejecución del Mantenimiento Dirigido en lo posible debe llevarse a cabo con base a programas preestablecidos que fundamentalmente son de tres tipos [18]:

- Programas de visitas
- Programas de inspecciones, pruebas y rutinas
- Programas de reparación y reconstrucción.

1.7.2.4.1 **Programas de Visitas.** Son las listas de los lugares o equipos a los cuales debe dirigirse el personal de mantenimiento, de acuerdo con la frecuencia que se haya estimado necesario, para desarrollar los trabajos encomendados por el fabricante, y por la experiencia propia de los técnicos especialistas en el área. Estos programas deben contener la cantidad y calidad del trabajo a desarrollar en cada visita, las horas-hombre necesarias y el orden de prioridad respectivo.

Buenos programas de visitas aseguran la atención adecuada de los equipos a mantener, debiendo implementarse con buenos diagnósticos y eficiente mano de obra, lo cual se traduce en inspecciones efectivas y rutinas bien ejecutadas.

1.7.2.4.2 **Programas de inspecciones, Pruebas y Rutinas.** Son listas que indican las partes de un artefacto o maquinaria que hay que inspeccionar, probar, o realizar sobre ellas actividades rutinarias como lubricación, ajuste o reemplazo de partes de recambio con una prioridad determinada.

Estos programas generalmente deben estar colocados al lado mismo de la maquinaria para permitir al personal de inspecciones o supervisores verificar si los trabajos han sido ejecutados.

La frecuencia normal con que se deben realizar, revisar y analizar los programas de inspección es anual, pero los cambios se harán con base a los resultados de la evaluación económica del programa aplicado en el período de trabajo anterior.

1.7.2.4.3 Programas de Reparación y Reconstrucción. Estos programas indican las actividades específicas de Mantenimiento Preventivo o Correctivo, detallando el personal que debe realizarlas y los plazos preestablecidos es decir, cuando debe empezar y cuando debe terminar cada trabajo.

Los programas de reparación y reconstrucción deben ser controlados debidamente, mediante la expedición de las órdenes de trabajo de mantenimiento, (OTM) necesarias, las que serán programadas con el fin de disponer del personal adecuado y los materiales y repuestos en el lugar y momento deseados.

Las órdenes de trabajo de mantenimiento, (ver Figura 2) deben contener en lo posible, los siguientes datos:

- Razón para la realización del trabajo y fecha de realización.
- Descripción explicativa de las actividades.
- Clase de personal que debe ejecutarlo.
- Lista de materiales y repuestos necesarios.
- Planos y diagramas con las especificaciones que se crea necesarias (opcional).
- Secuencia para realización del trabajo, cuando se tenga manual de mantenimiento (opcional).
- Firmas del solicitante y directivos que autoriza la realización, y si fuere necesario, casilla para la firma del ejecutor y supervisor del trabajo.

Si se aplican las pautas dadas anteriormente a cualquier sistema operante puede decirse que el departamento correspondiente cumple los requisitos para estar incluido en el contexto delimitado por la organización del Mantenimiento Dirigido.

1.8 EL MANTENIMIENTO CORRECTIVO

1.8.1 Generalidades

Por definición, Mantenimiento Correctivo es el conjunto de actividades desarrolladas en máquinas, instalaciones o edificios, cuando a consecuencia de una falla, han dejado de prestar la

calidad del servicio para la cual fueron diseñados. Por tanto, las labores que deben llevarse a cabo tienen por objeto la recuperación inmediata de la calidad del servicio.

Toda labor de Mantenimiento Correctivo, exige una atención inmediata, por lo cual esta no puede ser debidamente programada y en ocasiones solo tramita y controla por medio de reportes - Máquina fuera de servicio - y en estos casos el personal debe efectuar solo los trabajos absolutamente indispensables para seguir prestando el servicio, disminuyendo de esta manera al mínimo el tiempo de parada y la consiguiente producción pérdida. El Mantenimiento Correctivo es el tipo de mantenimiento más usado ya que es el que requiere de menor conocimiento, organización y en principio menor esfuerzo, aunque esto realmente no es así pues demanda trabajo anormal y por lo general fuera de horas hábiles.

La actividad fundamental que se desarrolla en Mantenimiento Correctivo es la reparación no planificada que resulta debido a la falla imprevista; antes que se realice la reparación propiamente dicha es necesario examinar el tipo y la causa del daño; esto es lo que suele llamarse comprobación del daño y mediante esta constatación se permite ver concretamente cuales son las operaciones que hay que efectuar.

1.8.2 Recursos Necesarios

Las averías y los paros en maquinaria se presentan aún en las fábricas que cuentan con un buen sistema de Mantenimiento Preventivo. Para la rápida solución de los problemas se requiere contar con un equipo de reparaciones especialmente preparado en los diferentes tipos de máquinas y equipos dentro de la planta. Los cuatro factores más importantes en el grupo de Mantenimiento Correctivo son [46]:

- El personal.
- El equipo (Maquinaria, herramientas, equipos de medición y control).
- El suministro de repuestos.
- La organización y las actividades de control.

Estos recursos fundamentales deben ser adecuadamente coordinados y complementados para lograr la eficiencia requerida en las labores urgentes.

El recurso humano tiene que ser apropiada y necesariamente explotado, pues es imposible mantener un equipo suficiente para atender todas las solicitudes de inmediato o en cualquier circunstancia; por tanto es deber de una buena dirección decidir el orden de prioridades en la realización de los trabajos, con las personas adecuadas para lograr la minimización de los gastos.

Para conseguir que las cosas se hagan mejor se requiere de estudio, buena información y comunicación, lo que señala la importancia básica de establecer y mantener programas permanentes de capacitación y formación de personal y simultáneamente estudiar, analizar y determinar los procedimientos y métodos de trabajo más eficientes.

Las necesidades de capacitación varían con los requerimientos particulares y se basan en una buena o mala selección de personal, ya que esta es una de las etapas de la organización, que requiere de mayor responsabilidad. El cuidado en la selección debe ser directamente proporcional a la importancia del cargo; por esto la selección de directivos es difícil por cuanto se requiere que sea a la vez buen técnico y buen administrador.

Otro aspecto a considerar es la importancia de que el personal que se envía a efectuar reparaciones este dotado de las herramientas y equipos apropiados para que pueda desempeñar su labor con rapidez y eficiencia; es decir que cuente con los demás recursos físicos en el sitio y momento oportuno, así como un adecuado suministro de repuestos y partes de recambio. Debe también instruirse acerca de la labor específica a realizar y los procedimientos lógicos a emplear para minimizar la posibilidad de fallas o errores humanos y así poder hacer uso provechoso de los recursos disponibles.

1.8.3 Clasificación del Mantenimiento Correctivo

Se pueden hacer varias clasificaciones particularizadas del sistema de Mantenimiento Correctivo [37].

Según la disponibilidad de tiempo para realizar la reparación que se deriva del tipo de parada presentada se clasifica en:

- **Mantenimiento Correctivo Ligero.** Aquel que restablece el servicio en el menor tiempo posible, para poder minimizar la duración de la parada.
- **Mantenimiento Correctivo Profundo.** Permite realizar una reparación a fondo del equipo, por cuanto el tiempo de duración de la parada no es determinante de la producción.

Según las circunstancias y políticas particulares de la empresa el Mantenimiento Correctivo puede ser:

- **Mantenimiento Correctivo Centralizado.** Opera bajo una sola cabeza central, tiene las ventajas de facilidad de supervisión, posibilidad de mayor capacitación, diversificación de labores y mejor control de tiempos y estándares.
- **Mantenimiento Correctivo Descentralizado.** Requiere de personal independiente en cada una de las áreas de la empresa, lo que permite atender las fallas más rápidamente y con mayor especialización, pero a la vez necesita de más personal que genera mayores gastos directos y permite más lapsos de tiempo ocioso ó improductivo.

Según las necesidades productivas de la empresa el Mantenimiento Correctivo se puede clasificar en:

- **Mantenimiento Correctivo Directo.** Restablece adecuadamente el equipo a partir del momento de la falla sin importar el tipo de parada ocasionada.
- **Mantenimiento Correctivo de Adaptación.** En el no se interviene el equipo en el momento de la falla, sino que esta se acepta como tal por ser obvia, y se continúa la operación del equipo bajo la condición de riesgo calculado el máximo tiempo posible, por razones de economía o por la necesidad de cumplir compromisos comerciales.

1.8.4 Razones de Alto Mantenimiento Correctivo

Existen siete razones primordiales para tener un excesivo Mantenimiento Correctivo:

- Mantener la maquinaria 100% del tiempo programada para producción.
- Permitir tiempos muy limitados para los trabajos de mantenimiento.
- Falta de inventario conveniente y económico de refacciones.
- Mala calidad de los trabajos por la premura de la realización.
- Mala preparación y programación de los trabajos originados por fallas imprevistas.
- Mala estimación de la carga de trabajo que se puede llegar a presentar.
- Falta de diagnóstico acertado de las causas de las fallas anteriores.

1.8.5 Proceso Resolutivo al Mantenimiento Correctivo

Se debe tener en cuenta los siguientes puntos para un correcto proceso resolutivo de los problemas presentados en Mantenimiento Correctivo:

Identifique su problema, diagnostique la causa de él!

- Proponga soluciones alternativas!
- Evalúe y decida!
- Planee la solución mejor!
- Establezca prioridades, Clasifíquelas!
- Determine carga de trabajo!

- Confronte carga y fuerza de trabajo!
- Programe!
- Dirija y realice!
- Controle y corrija!.

2. EL MANTENIMIENTO PREVENTIVO Y PREDICTIVO

2.1 CONCEPTOS SOBRE MANTENIMIENTO PREVENTIVO

Son muchas las definiciones que actualmente encontramos del Mantenimiento Preventivo, pero todas ellas se caracterizan porque se interviene el equipo antes de que se presente el paro o falla.

Podemos definir el Mantenimiento Preventivo como: El conjunto de actividades programadas a equipos en funcionamiento que permiten en la forma más económica, continuar su operación eficiente y segura, con tendencia a prevenir las fallas y paros imprevistos.

Esto significa que un programa de Mantenimiento Preventivo incluye dos actividades básicas [37]:

- Inspección periódica de los equipos de planta, para descubrir las condiciones que conducen a paros imprevistos de producción.
- Conservar la planta para anular dichos aspectos, adaptarlos o repararlos cuando se encuentren aún en etapa incipiente.

A menudo se considera el Mantenimiento Preventivo como sinónimo de Mantenimiento Planeado, Mantenimiento Programado o Mantenimiento Dirigido; el Mantenimiento Preventivo debe ser una parte importante de todas estas funciones, pero no el único elemento. En cada empresa de acuerdo a la naturaleza de sus actividades y su sistema productivo, es factible establecer un programa de Mantenimiento Preventivo, que sea de fácil implementación; normalmente toda empresa cuenta con los equipos, parte del personal, talleres e instalaciones para llevar a cabo este tipo de mantenimiento.

Para la implantación de un sistema de Mantenimiento Preventivo son necesarias ciertas bases, quizá la más importante es la participación ideológica de todos los sectores involucrados; el éxito de un programa se basa fundamentalmente, en que se venda la idea del Mantenimiento Preventivo a cada uno de los integrantes de la planta, a la Gerencia, a los Ejecutivos de producción, a los Supervisores de mantenimiento y a los técnicos. Es necesario un conocimiento a fondo de lo que conforma el sistema, su metodología y su forma de administración, con miras a obtener el verdadero objetivo del Mantenimiento Preventivo de lograr un menor costo de producción de un producto de calidad.

Es necesaria una aplicación selectiva del programa de Mantenimiento Preventivo; se considera que es demasiado riesgo aplicarlo a toda la planta de una vez, lo mejor es ir construyendo el programa paso a paso, sin importar lo rápidamente que se pueda integrar; hasta cuando se termine un paso se debe comenzar el siguiente. Una vez que se hagan los programas de inspección y la lista de tareas a realizar, estas se deben ejecutar periódicamente puesto que el desarrollo mismo del programa va dando las pautas para las correcciones a que haya lugar. Es conveniente, también, que una vez implantado el programa sea manejado con suma honestidad, es decir que los trabajos programados sean realizados a conciencia y que los informes se ajusten lo más exactamente posible a las labores desarrolladas.

Cualquier persona que espere los beneficios completos del Mantenimiento Preventivo en forma rápida se desalentará. Es obvio que todo cambio de sistema produce traumas y problemas que deben ser resueltos en la primera fase. Uno de los problemas principales cuando se introduce un sistema de Mantenimiento Preventivo es el aumento del costo de Mantenimiento General puesto que en las primeras inspecciones se encuentra un gran número de fallas que deben ser corregidas, debido al alto deterioro de los equipos que tradicionalmente han sido manejados con base en un Mantenimiento Correctivo. Por eso se recomienda que antes de aplicar el Mantenimiento Preventivo los equipos se deben poner en óptimas condiciones de funcionamiento lo cual implica altos costos por reparaciones generales.

Un plazo prudencial para la implantación de un sistema de Mantenimiento Preventivo es de dos a tres años. La impaciencia puede malograr el sistema, por lo tanto es necesario que todas las personas relacionadas se enteren también de las dificultades que se presentan, para que colaboren en la mejor forma posible para el éxito del programa. Se puede afirmar además que implantar el Mantenimiento Preventivo exige un cambio de mentalidad, una férrea voluntad de hacerlo y un sólido convencimiento de la bondad del sistema.

2.2 CLASIFICACIÓN DEL MANTENIMIENTO PREVENTIVO

El Mantenimiento Preventivo desde el punto de vista del tiempo y forma de realización se puede clasificar en cuatro tipos claramente delimitados:

2.2.1 Mantenimiento Preventivo Provisional

Se caracteriza por la realización de actividades preventivas ligeras, derivadas de las inspecciones, que permiten la operación del equipo durante un lapso de tiempo adecuado para descubrir las posibles fallas futuras y sus causas, y con base en ello, la planificación más conveniente del mantenimiento requerido.

2.2.2 Mantenimiento Preventivo Directo

Consiste principalmente en inspecciones detalladas, con el equipo fuera de servicio y las acciones inmediatas encaminadas a reducir la probabilidad de falla.

2.2.3 Mantenimiento Preventivo de Desarrollo

Se caracteriza por actividades preventivas que se adelantan mucho a la probabilidad de falla, con el objeto fundamental de mejorar el comportamiento general del equipo.

2.2.4 Mantenimiento Preventivo Planeado

Se denomina así, solamente a las actividades preventivas que se realizan en los equipos como consecuencia de un convenio preestablecido entre proveedor-consumidor, para satisfacer las condiciones de la garantía y lograr la mayor economía en las reparaciones futuras, y costo de las piezas de recambio.

2.3 VENTAJAS DEL MANTENIMIENTO PREVENTIVO

Cualquier programa de mantenimiento Preventivo bien elaborado y apropiadamente aplicado, producirá beneficios que sobrepasan los costos. Entre las múltiples ventajas del mantenimiento Preventivo, las más importantes son las siguientes:

- Reducción de las paradas imprevistas de los equipos. Se disminuye el tiempo ocioso, en relación con todo lo que se refiere a economías y beneficios para la empresa.
- Menor necesidad de reparación en gran escala y menor número de reparaciones repetitivas, por lo tanto, menor acumulación de la fuerza de trabajo de mantenimiento y equipo.
- Menor necesidad del equipo en operación, reduciendo con ello la inversión de capital.
- Cambio del mantenimiento deficiente de - paros imprevistos - a mantenimiento programado que siempre es menos costoso, con el cual se logra mejor control del personal, materiales y equipos.
- Disminuye los pagos por tiempo extra de los trabajadores de mantenimiento originados por las reparaciones imprevistas.

- Disminuye los costos de reparaciones de los desperfectos sencillos, realizados antes de los paros imprevistos, debidos a la menor fuerza de trabajo, o a las pocas técnicas empleadas y a la menor cantidad de partes que se necesitan para los paros planeados.
- Reducción de los costos de mantenimiento, de mano de obra y materiales, para las partidas de activos que se encuentran en el programa.
- Mejor control de refacciones, lo cual conduce a tener un inventario menos costoso.
- Aplazamiento o eliminación de los desembolsos por reemplazo prematuro de planta o equipo, debido a la mejor conservación de los activos e incremento de su vida útil probable.
- Menor número de productos rechazados, menos desperdicios, mejor control de calidad, debido a la correcta adaptación del equipo.
- Menor costo unitario, al aumentar el tiempo útil de producción.
- Mayor seguridad para operarios y maquinaria.
- Facilita el control sistematizado de la programación.
- Es fuente incalculada de valiosos datos estadísticos.

2.4 PROGRAMAS DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO

2.4.1 Tipos de Programas

En cada industria dependiendo del tipo de actividades o proceso productivo, es posible establecer un programa diferente de Mantenimiento Preventivo.

El Mantenimiento Preventivo varía de acuerdo al tipo de fábrica, plantas dentro de una misma industria, proceso, equipos, sistemas de operación, localización, etc. Las variables que influyen en cada programa son múltiples e interconectadas. Un plan de Mantenimiento Preventivo será siempre activo y cambiante con las experiencias adquiridas.

Los principales tipos de programas de Mantenimiento Preventivo de aplicación industrial se pueden agrupar en tres:

- **Mantenimiento Preventivo Periódico Permanente.** Programa realizado de acuerdo a un orden lógico de actividades de mantenimiento según recomendaciones del fabricante.

- **Mantenimiento Preventivo Periódico Productivo.** Programa elaborado en un 100% de acuerdo con las necesidades productivas, se realiza después de elaborar los programas de producción.
- **Mantenimiento Preventivo Periódico por Over-Haul.** Programa aplicable en las paradas generales de fábricas o empresas que suspenden totalmente las actividades productivas durante una o dos veces al año.

Según las necesidades específicas se recomienda a las diferentes empresas adoptar algún programa de los anteriores.

En la fabricación de productos que requieren ser elaborados con continuidad durante las 24 horas del día, generalmente no es aplicable ninguno de los programas anteriores, sino que lo recomendable es:

La elaboración de un programa que considere las necesidades de producción pero con la máxima tendencia a ser del tipo periódico permanente.

Es necesario concientizar a Producción y a Ingeniería de Mantenimiento de las necesidades de producción y de mantenimiento para que conjuntamente se elaboren los programas de Mantenimiento Preventivo para lograr el mayor provecho posible.

2.4.2 Aplicación de los Programas

Antes de aplicar un programa de mantenimiento Preventivo hay necesidad de cubrir dos etapas fundamentales, que son la programación y la implantación propiamente dicha.

La etapa de programación debe cubrir cuatro actividades importantes:

2.4.2.1 Determinar el orden en que se programa el Mantenimiento Preventivo. Que es la escogencia de los equipos para determinar en que orden se deben realizar las diferentes actividades de Mantenimiento Preventivo estableciendo además, hojas de vida con los datos técnicos y todas aquellas especificaciones que se crean necesarias. Las Figuras 3 y 4 muestran los formatos típicos para la elaboración de las hojas de vida y la historia de la maquinaria. Los datos consignados servirán para comprobar las características del equipo cada vez que sean requeridos, y con base en ellos realizar una mejor programación preventiva.

2.4.2.2 Clasificar los Tipos de Programas. Fundamentalmente en dos grupos, aquellos que no requieren parar el equipo, y los que deben estar acompañados de una parada programada del equipo, pues el tipo de inspecciones necesarias así lo requiere.

2.4.2.3 Preparación del Manual de Inspecciones. Etapa básica que consiste en recopilar y tener disponible toda la información necesaria para elaborar:

- Instrucciones de montaje
- Instrucciones de operaciones
- Manuales de mantenimiento y
- Formatos de inspección.

Esta información debe ser obtenida por las casas fabricantes, las empresas de servicio especializado, los técnicos especialistas o de las personas más experimentadas en operación y mantenimiento de los respectivos equipos.

La preparación de los manuales es una de las etapas difíciles de la programación del Mantenimiento Preventivo pues a pesar de ser de uso imperativo generalmente son de complicada elaboración por el tiempo y dedicación que exigen y por la experiencia requerida para su ejecución.

2.4.2.4 Integración de los Grupos de Trabajo. Según las necesidades específicas los grupos de trabajo deben ser formados de acuerdo con las actividades a desarrollar y la capacitación y entrenamiento requeridos.

Cuando se hace con base en el nivel jerárquico, generalmente son de tres tipos:

- Profesionales experimentados
- Supervisores o técnicos experimentados
- Operarios experimentados.

2.4.3 Frecuencia de las Inspecciones

Un aspecto muy importante para lograr una buena programación de Mantenimiento Preventivo es la fijación de las frecuencias de inspección, lo cual influye preponderantemente en los costos y economías del programa. La decisión de cuan a menudo inspeccionar es fundamentalmente un asunto experimental; la tendencia inicial es la inspección excesiva, la cual aumenta innecesariamente los costos y puede involucrar más tiempo ocioso de producción que un paro de emergencia. Sin embargo, la subinspección produce más paros y descomposturas cuyos costos son mucho mayores que los ahorros en inspecciones. Se necesita por lo tanto un equilibrio óptimo para lograr buenos resultados.

La etapa básica en la fijación del ciclo de frecuencia es el análisis técnico del equipo que tenga en cuenta los siguientes puntos [39]:

- **Edad, condición y costo.** El equipo más antiguo y con mayor deterioro requiere servicios de inspección más frecuentes, pero siempre con base en el análisis económico que justifique su mantenimiento.

- **Severidad del servicio.** Según la carga de trabajo de un equipo debe variar la frecuencia de inspección, para equipos idénticos el de carga más severa requiere ciclos más cortos.
- **Requisitos de seguridad.** Dependiendo de los riesgos que afectan la seguridad de personas e instalaciones las frecuencias de inspección deben hacerse mayores para disminuir al mínimo las situaciones peligrosas.
- **Susceptibilidad de deterioro.** Con base a la vida útil probable y las condiciones del medio donde opera el equipo la posibilidad de deterioro varía considerablemente y por lo tanto las frecuencias de inspecciones deben ser mayores para las condiciones más desfavorables.
- **Condiciones particulares de operación.** Las frecuencias de inspección deben también ajustarse teniendo en cuenta las condiciones de operación para el equipo tomado individualmente, que tiene que ver con sobrecargas, operación inadecuada, vibraciones debidas al tipo de montaje, susceptibilidad de perder los ajustes, etc.

En el proceso de determinación de frecuencias se debe adicionalmente, revisar las recomendaciones de los fabricantes para fijar las condiciones propias de la planta y mientras no se tengan motivos suficientemente justificados lo mejor es seguir esas recomendaciones.

2.5 IMPLANTACIÓN DE UN SISTEMA PREVENTIVO

Para la implantación de un sistema de Mantenimiento Preventivo es tan importante el desarrollo del programa, como el vender la idea del plan, a cada uno de los integrantes de la planta, desde la Gerencia Superior hasta el personal de Mantenimiento y Producción, para lograr el convencimiento sobre la conveniencia del programa, de todos los interesados. Con base en lo anterior podemos decir que en la implantación de un sistema de Mantenimiento Preventivo se requieren cuatro condiciones:

2.5.1 Vender la Idea del Plan

En primer lugar a la Gerencia, cuyo apoyo posterior influirá en el éxito del programa. Siguiendo el orden jerárquico, a los Superintendentes y jefes de otros Departamentos, para continuar con el personal de Producción, de Mantenimiento y en general de todos los interesados.

2.5.2 Crear Conciencia Sobre los Beneficios del Sistema

Se requiere por tanto, el convencimiento de todo el personal relacionado, de la conveniencia para la empresa de la implantación del programa, y de esta forma, obtener una decidida colaboración.

2.5.3 Establecer Técnicamente los Programas de Inspección

Para que cualquier programa sea una realidad, es indispensable que haya sido técnicamente bien elaborado en cuanto a tipos de inspecciones y periodicidad se refiere; que sea encausado y dirigido en su ejecución por supervisores que conozcan satisfactoriamente los equipos y que sea ejecutado por operarios diestros, cuidadosos y responsables.

2.5.4 Diseñar Controles Efectivos para el Programa

Una vez establecido el sistema, lo indispensable es su control para que haya continuidad de su desarrollo, revisiones oportunas y evaluaciones con la adecuada periodicidad.

Un eficiente control del sistema debe incluir [2]:

- Cumplimiento estricto de los programas sin interrupción.
- Ubicación adecuada de los puntos y medios de control.
- Responsabilidad en el manejo de los programas de Mantenimiento Preventivo.
- Procedimiento para control de los costos de mantenimiento.

Adicionalmente, a las condiciones enumeradas, se puede decir que para la implantación de un programa es indispensable el acuerdo con producción, que se debe basar en un informe del estado real de la maquinaria y el cumplimiento de los plazos estipulados para mantenimiento con base al análisis detallado que permita a producción decidir hasta donde pueden llegar los trabajos para cumplir satisfactoriamente los programas productivos.

Para lograr el acuerdo mencionado y diseñar un apropiado sistema preventivo, finalmente, debemos tener siempre en cuenta las siguientes premisas:

- Producción es el dueño de los equipos.
- Todo equipo requiere mantenimiento y sin el no se puede producir.
- Mantenimiento debe, en lo posible, intervenir en la planeación de producción.
- La finalidad del mantenimiento es permitir la máxima producción, pero con la calidad requerida.
- Son necesarios los buenos planeadores, pero son más indispensables los buenos ejecutores.
- Mantenimiento siempre debe dar el visto bueno a todos los materiales requeridos para mantenimiento.
- Debe existir completa comunicación entre producción y mantenimiento.

2.6 EL SISTEMA L. E. M.

Una detallada investigación realizada en los años 50 sobre el estado del mantenimiento en las Empresas Latinoamericanas llevó al Ingeniero John G. Castles [16] al diseño y definición de un nuevo sistema de Mantenimiento Preventivo aplicable a este tipo de industrias que se debía basar fundamentalmente en tres puntos:

- Ser de fácil administración
- Ser de fácil organización
- Ser de fácil comprensión.

El sistema desarrollado lo denominó Sistema L.E.M. y lo aplicó inicialmente en las plantas de refinación de Plomo y Cobre en la Oroya, Perú, hacia 1960.

La fundamentación del sistema implica la prestación de servicios adecuados y oportunos a los diferentes equipos de acuerdo con tres grupos de labores principales que se codifican con las letras L. E. y M.. Al primer grupo corresponden las actividades de Lubricación, al segundo las de Mantenimiento Eléctrico y Electrónico y al tercero las de Mantenimiento Mecánico cuyas iniciales dieron origen al nombre del sistema.

Las labores a realizar en cada grupo son el resultado de un minucioso análisis de los equipos, sus componentes y su operación, la cual se complementa en lo posible con las recomendaciones de los fabricantes en cuanto a lubricación y frecuencia de las revisiones, que aparecen normalmente en los manuales de operación y mantenimiento.

El sistema de control se hace mediante la elaboración de una tarjeta por equipo que contiene además de los datos técnicos, todos los elementos necesarios para poder elaborar los programas semanales de trabajo, los cuales se revisarán con esta periodicidad y se programarán según los resultados semestral o anualmente.

Mediante el sistema de Mantenimiento L.E.M. se determina para cada uno de los tres grupos de actividades, que operación de mantenimiento específica debe hacerse a cada equipo (consignada en el manual de Mantenimiento Preventivo), con que frecuencia y cuanto tiempo toma él realizarla (consignado en la tarjeta maestra respectiva). Con los datos anteriores correctamente diligenciados se permite a producción conocer cuántas horas debe destinar al mantenimiento de su equipo en el año, para programar su operación en consecuencia; y al departamento de Mantenimiento conocer las horas-hombre necesarias por equipo para determinar las necesidades de personal para Mantenimiento Preventivo.

En la década del 70 el sistema L.E.M. ha sido implementado en algunas industrias Colombianas y ha obtenido un desarrollo importante en los últimos años con la utilización del procesamiento automático de datos, que permite un manejo más eficiente de la información de los programas, facilitando su análisis, control y registro de estadísticas.

2.7 QUE ES EL MANTENIMIENTO PREDICTIVO?

En los últimos años se ha venido aumentando notoriamente en la industria, la aplicación del Mantenimiento Predictivo como complemento fundamental del Mantenimiento Preventivo y Correctivo. Este incremento responde a diversidad de factores entre los que podemos enumerar, los nuevos desarrollos tecnológicos en equipos de diagnóstico, medición y control; la tecnificación de la producción en líneas de proceso continuo, las máquinas modernas altamente costosas e interdependientes, los altos costos de repuestos y reposición de equipos y especialmente el que se ha logrado un alto grado de concientización sobre los costos de los paros de producción.

El Mantenimiento Predictivo basado en la utilización de equipos de diagnóstico para el análisis de fallas es la respuesta conveniente para la conservación económica de los equipos y la minimización de las paradas.

El sistema Mantenimiento Predictivo se define como " el conjunto de actividades, programadas para detectar las fallas de los equipos por revelación antes que sucedan, con los equipos en operación y sin perjuicio de la producción, usando aparatos de diagnóstico y pruebas no destructivas" [50].

Aunque existen diversas técnicas adicionales de aplicación del Mantenimiento Predictivo como la Radiografía, la Termografía o la Termovisión, el Mecanálisis de Ruidos y otras pruebas no destructivas, se ha generalizado que el Mantenimiento Predictivo está basado en la medición y análisis de vibraciones, y que toma como principio el hecho de que si una máquina se encuentra en buenas condiciones de operación no debe ser intervenida.

Las vibraciones representan una medida excelente para evaluar las condiciones mecánicas de un equipo; antes que una causa, la vibración es un síntoma de una falla potencial, cuyo origen se puede determinar mediante el análisis espectral de la frecuencia de vibración. El nivel de vibración es un indicador tan importante del estado de la maquinaria, como lo es la temperatura del cuerpo para el ser humano; cualquier cambio o anomalía en el nivel de vibración indica sin lugar a dudas cambio y posible deterioro en las condiciones de la maquinaria. Por lo tanto, un análisis comparativo de éstos cambios, en el cual los niveles de vibración son confrontados con patrones preestablecidos, permite a través de una técnica confiable, lógica y probada diagnosticar el defecto específico; mediante la frecuencia se determina el tipo de falla, mientras que la amplitud de las mediciones sirve para determinar la severidad del daño, con un alto grado de exactitud.

En forma generalizada un programa de Mantenimiento Predictivo consiste en llevar un control periódico de los niveles de vibración para cada equipo, teniendo como parámetros de medición, las características de vibración, la variación de temperaturas y el aumento del consumo de energía. Los elementos característicos de una señal de vibración son: Su frecuencia, su ángulo de fase y su amplitud, esta última puede ser medida como un desplazamiento, velocidad o aceleración. Como cada máquina tiene preestablecidos sus parámetros de funcionamiento en condiciones óptimas y sus límites permitidos de vibración, cuando éstos patrones varían indican los cambios en las

condiciones de funcionamiento del equipo, que al ser analizados determinan las medidas correctivas que se deben tomar, programando la reparación u operación del equipo con el conocimiento real de sus necesidades.

2.8 MANTENIMIENTO PREVENTIVO VS. PREDICTIVO

Debido al alto costo de inversión, reparación y reemplazo, así como la alta interdependencia en los procesos productivos de las máquinas modernas, su protección ha llegado a tener la máxima prioridad. Esto significa mantener las máquinas críticas en óptimas condiciones y pararlas solamente cuando sea indispensable.

Para esto se requiere la capacidad de detectar problemas en su primera etapa de formación antes de que se aumenten lo suficiente para originar los daños.

Como una actividad fundamental en la protección de maquinaria, se introdujo hace ya bastante tiempo, el sistema de Mantenimiento Preventivo, que como se trato anteriormente, consiste en inspeccionar las máquinas periódicamente, en lapsos de tiempo estimados con base en estadísticas y fruto de la observación y experiencia del personal encargado. Sin embargo para que la inspección permita determinar el estado de funcionamiento real del equipo e identificar sus fallas, es necesario que esta sea una inspección abierta, que en muchos casos se convierta en el mayor inconveniente del sistema y que no se presenta en el mantenimiento predictivo.

En las inspecciones preventivas cuando una máquina se encuentra operando en condiciones aceptables, se desarma y se vuelve a armar, por experiencia se ha demostrado que en más del 20% de los casos se introducen defectos que inicialmente no se tenían y que darán origen a fallas prematuras, que no se hubieran presentado si no se realiza la inspección.

Con el Mantenimiento Predictivo el uso de sensores, acelerómetros y demás instrumentos de diagnóstico, se evita el problema nombrado y se evitan las paradas preventivas, con lo cual se protege la maquinaria, en el aspecto de disponibilidad productiva principalmente.

Otro aspecto importante a considerar en la comparación de los dos sistemas de Mantenimiento es el concerniente al costo y gasto del inventario de refacciones, que en las actividades preventivas en la mayoría de los casos, se aumenta considerablemente, por cuanto muchas partes son cambiadas antes del término de su vida útil segura, para prevenir las fallas. Mediante el análisis predictivo las partes de recambio serán reemplazadas acertadamente solo cuando están próximas a presentar fallas, es decir lográndose su máxima utilización, que se traduce en protección de las utilidades. El principio de operación del sistema predictivo dice por tanto, que solamente se interviene una máquina, cuando los instrumentos detectan una próxima falla de un rango específico de severidad.

Con el Mantenimiento Preventivo se tiene tendencia a realizar sobre-mantenimiento si se cuenta con los recursos, o a realizar las inspecciones superficialmente permitiendo las fallas, cuando el personal es insuficiente o no esta debidamente capacitado. Mediante el Mantenimiento Predictivo se logra programar con suficiente antelación el mantenimiento estrictamente necesario, y de esta manera disminuir y controlar los gastos de departamento.

2.9 BENEFICIOS DEL MANTENIMIENTO PREDICTIVO

La inversión que se haga en mantenimiento predictivo es totalmente justificada, si se logra el objetivo fundamental del programa con los siguientes ahorros derivados de los beneficios generales, entre los cuales podemos considerar:

- La detección precoz de fallas incipientes que convierten los daños en rutinas programadas de mantenimiento.
- La eliminación de las inspecciones periódicas de Mantenimiento preventivo, en que hay que desarmar los equipos.
- Aumento del período entre revisiones detalladas e inspecciones generales de mantenimiento preventivo.
- Eliminación casi total de las fallas inesperadas, lo cual se refleja en una mayor productividad.
- Aumento del factor de servicio por determinación de la severidad de los problemas y disminución del tiempo de paro necesario para hacer las reparaciones debidamente programadas.
- Ahorro y disminución del inventario de repuestos, ya que estos se reemplazan solamente cuando se les ha agotado su vida útil.
- Corrección a tiempo de muchos problemas de montaje que producen fallas recurrentes en la maquinaria.
- Reducción del número de equipos iguales en Stand-Bay gracias al incremento de la confiabilidad de los que se encuentren en operación.
- Ahorro apreciable en los consumos de energía de los equipos, cuando trabajan en óptimas condiciones.
- Garantía del cumplimiento de las características de diseño y aumento general de la seguridad de equipos e instalaciones.

Cuando se ha logrado crear conciencia de los beneficios del sistema y se ha tomado la decisión de implantarlo, al evaluar las alternativas se debe tener en cuenta además, que debido a la existencia de múltiples métodos y equipos para la medición de vibraciones, todos ellos tienen características diferentes. Los equipos portátiles ofrecen menor protección a menor costo, mientras que los automáticos más sofisticados protegen muy bien las máquinas a un precio considerablemente mayor, pero para cada planta y proceso hay un sistema de medición que efectivamente puede salvar a la empresa de millonarias pérdidas al no incluir en su mantenimiento las técnicas modernas del Mantenimiento Predictivo.

2.10 IMPLEMENTACIÓN DEL MANTENIMIENTO PREDICTIVO

Para la implementación de un sistema de Mantenimiento Predictivo, que lógicamente supone una inversión relativamente considerable, se debe hacer un estudio particularizado de las condiciones de la empresa y un análisis concienzudo, que evalúe y resuelva las alternativas iniciales basándose en los siguientes puntos [29]:

2.10.1 Establecimiento de la Necesidad del Sistema.

Para ello se requiere un análisis detallado utilizando dos criterios fundamentales:

- Criterio económico
- Criterio estratégico.

El criterio económico analiza los costos del mantenimiento en función de sus tres componentes:

- Costo de mano de obra
- Costo de equipos y repuestos
- Costo de producción perdida.

El análisis de costos relaciona la inversión en mantenimiento, como costos directos y costo del tiempo perdido, y cuando éste último es muy alto se justifica un aumento en la inversión, ya que el costo mínimo total ocurre cuando el costo anual, o de un período de tiempo seleccionado, de la producción perdida es aproximadamente igual a la suma del costo anual del personal y demás recursos físicos. Ver Figura 5.

El criterio estratégico evalúa la incidencia de diversos factores en la empresa entre los que podemos destacar:

- Volumen de paradas
- Volumen de maquinaria importante
- Comportamiento de los equipos con el deterioro
- Recursos actuales para mantenimiento
- Interdependencia de los equipos en el proceso productivo.

Estos factores, asociados al tamaño y desarrollo tecnológico de la empresa, permiten justificar la adopción del sistema.

2.10.2 Ajuste de la Estructura Organizativa del Departamento.

Se requiere separar el personal de Mantenimiento predictivo del grupo de Mantenimiento Correctivo. Para poder llevar a cabo las inspecciones programadas se necesita personal disponible y bien capacitado en la nueva tecnología; de cualquier otra forma, la urgencia de las operaciones correctivas impiden realizar las labores preventivas y predictivas.

Cuando la programación de actividades predictivas no es suficiente para copar el personal asignado se puede balancear la carga de trabajo con operaciones de programación y control, u otras labores de Ingeniería de Mantenimiento.

2.10.3 Evaluación de las Diferentes Alternativas de Operación.

Existen cuatro alternativas de operación para la implantación de un sistema de Mantenimiento Predictivo.

- **Contratación del servicio.** Es la opción más sencilla y efectiva ya que no requiere gran inversión y capacitación inicial, y existen las empresas especializadas en la prestación del servicio. Esta alternativa además de ágil, cumple los propósitos de información, capacitación y prueba, para determinar los beneficios del sistema en forma práctica, y analizar su posible implantación posterior por parte de la empresa.
- **Medición de variaciones mas servicio de análisis.** Es la segunda posibilidad en la implantación del sistema y consiste básicamente en la adquisición por parte de la empresa de equipos de diagnóstico sencillos y de bajo costo, para tomar mediciones en el ámbito general, y poder determinar por la severidad de las vibraciones cuando se requiere solicitar el servicio de análisis más detallado. Esta alternativa tiene como ventajas principales, la menor dependencia del servicio exterior y él ir vinculando al personal propio a la nueva tecnología.
- **Medición y grabación de vibraciones mas servicio de análisis.** Esta posibilidad presenta una etapa más avanzada que la alternativa anterior y acentúa sus ventajas. Consiste en adicionar una grabadora especializada al equipo de análisis, para grabar los parámetros medidos y enviar al servicio de diagnóstico exterior el cassette con la señal que se requiere analizar. Esta etapa

de la programación y control de las inspecciones se hace completamente por parte de la empresa y solamente se requiere contratar el servicio de análisis especializado, mientras se entrena y capacita al personal propio.

- **Medición y análisis con equipos propios.** Es el nivel más complejo de la implementación, requiere de la adquisición del equipo de análisis apropiado y la asignación de personal previamente capacitado para su operación. En esta alternativa se considera el equipo de análisis como un elemento integrante del sistema de mantenimiento y se justifica la inversión cuando se desea eliminar las paradas de planta por el alto costo de tiempo perdido.

La decisión de la alternativa más aconsejable se debe basar en un análisis económico apropiado de acuerdo con las condiciones particulares de la maquinaria, tipo de proceso y tamaño de la empresa.

2.10.4 Determinación del Sistema de Control

El control periódico de los niveles de vibración puede llevarse a cabo de diferentes formas y con diferentes niveles de instrumentación de acuerdo con la alternativa seleccionada. Para ello se recomienda clasificar los equipos a incluir en el programa dentro de las tres categorías fundamentales [48]:

- **Máquinas de propósito general** (no críticas). Requieren medidores de vibración simple y analizadores de espectro; estos equipos pueden ser inspeccionados por un técnico experimentado, que si encuentra vibraciones anormales reporta la necesidad de una inspección más profunda.
- **Máquinas mayores o semicríticas.** Debido a que su falla causa paradas mayores, requiere analizadores de tiempo real (RTA) y utilización de monitores con una frecuencia al menos bimensual; estos equipos pueden ser manejados por un Ingeniero principiante o un técnico bien entrenado que cuando encuentre condiciones anormales debe incrementar el control mientras llega el momento de la reparación.
- **Máquinas críticas.** Debido a que su falla causa paradas críticas de producción requieren en lo posible medición continua con acelerómetros fijos, o análisis de vibración en línea con equipos RTA automáticos con pantalla y sistemas de monitores soportados con procesadores de diagnóstico, con una frecuencia al menos mensual. La maquinaria crítica debe ser analizada por Ingenieros de Mantenimiento Predictivo, quienes además deben registrar las condiciones de trabajo, temperaturas, velocidades, presiones, consumo de energía y demás variables del proceso que son auxiliares para un correcto diagnóstico.

Después de la determinación del sistema de control más adecuado y la asignación de las correspondientes responsabilidades se recomienda, la utilización permanente de los servicios de información técnica que suministran sobre esta nueva tecnología, las asociaciones y entidades

especializadas (API, ASME, NEMA, EPRI, VIBRATION INSTITUTE, etc.), y la capacitación dada por los fabricantes y distribuidores de equipos de diagnóstico. Finalmente, un sistema de control adecuado sirve para lograr en poco tiempo una cuantificación real de los beneficios del sistema predictivo.

2.11 EL ANALISIS VIBRACIONAL

2.11.1 Principios Generales

Las vibraciones que ocurren en la maquinaria rotatoria principalmente, son el resultado de defectos mecánicos, causas inherentes a su forma de operación, o proceder de fuentes exteriores.

La vibración es un movimiento oscilatorio, trepidatorio o de vaivén, de la máquina o de un elemento de la misma, apartándose de su posición de reposo. Un ejemplo simple para apreciar la vibración es seguir el movimiento de un peso suspendido en un resorte, cuando se le aplica una fuerza que lo desplaza de su punto de equilibrio al cual tiende a regresar, pero generalmente lo hace con una cierta velocidad y lo sobrepasa hasta llegar a un punto límite y regresar, rebasando nuevamente, en sentido inverso la posición neutral. La masa continuará vibrando y gradualmente disminuye su amplitud debido a las pérdidas de fricción.

La vibración en un sentido más amplio, es un movimiento periódico, que se reproduce con todas sus características, en un intervalo de tiempo denominado período. Mientras que no exista una fuerza de excitación, no habrá vibración; cuando esta fuerza se remueve; la maquinaria o elemento vibra a una frecuencia natural, determinada por la relación de masa y elasticidad. La vibración es libre si una vez removida la excitación, el movimiento oscilatorio continúa, y es forzada si el movimiento vibratorio persiste debido a la existencia de la fuerza excitadora.

Analizando la relación entre el movimiento del peso en el resorte, contra el tiempo transcurrido, se tiene la posibilidad de estudiar los detalles característicos de la vibración.

El tiempo requerido para el recorrido completo de un ciclo, equivale al período de la vibración. El número de ciclos por la unidad de tiempo es la frecuencia de la vibración. El desplazamiento total recorrido en sentido de la oscilación es la amplitud de la vibración. Mientras el peso esté en movimiento, tiene que hacerlo a cierta velocidad, pero esta velocidad varía con la posición, en los límites de la carrera la velocidad es cero, alcanzando su valor máximo al pasar por el punto neutro. La posición en cualquier instante dado, tomando un punto fijo de referencia es la fase de la vibración, o, medida de una porción de círculo expresado en grados.

Las características de la vibración que se mide con más frecuencia son [11]:

- La amplitud

- La frecuencia
- La fase.

La amplitud máxima y la velocidad nos revelan la intensidad de las vibraciones presentes e indican hasta que grado son buenas o malas las condiciones de la máquina.

La frecuencia nos revela la causa que origina la falla, y por tanto es la característica más importante de las mediciones. Si se compara con la velocidad de rotación, o múltiplos de esta se puede determinar que parte ocasiona la vibración y la causa del defecto.

La fase se emplea para el balanceo o equilibrio, y es también un factor muy útil para precisar las causas de la vibración.

Las causas de las vibraciones provienen de los cambios constantes de una fuerza que modifica continuamente su dirección y su intensidad. Las fluctuaciones de esta fuerza da origen a la vibración y las características resultantes se determinan por el reconocimiento de la forma en que es generada esta fuerza.

El movimiento rotatorio de las correspondientes partes de las máquinas da origen a las fuerzas generadoras que cambian de intensidad y dirección en la misma forma que la parte móvil cambia su posición; por esto las vibraciones tienen una frecuencia directamente dependiente de la velocidad de rotación de la parte que presenta el defecto, y con esta frecuencia se determina la parte afectada por el desperfecto.

El procedimiento para determinar las características de las vibraciones es llamado análisis de vibraciones; este análisis espectral de la frecuencia de la maquinaria, proporciona registros detallados altamente definidos de las características mecánicas, y es la base para la formulación de diagnósticos y para la toma de decisiones.

En la Figura 6 se muestran algunos espectros típicos de las fuentes de fallas más comunes que ocasionan vibraciones. Estadísticamente se ha confirmado que hay tres problemas predominantes que son responsables de más del 80% de las fallas de maquinaria que son:

- El desbalanceo
- El desalineamiento
- La inestabilidad de cojinetes.

Dichos problemas, los cuales conducen secuencialmente a vibraciones, usando el equipo apropiado, pueden ser analizados para detectar y hacer un correcto diagnóstico de:

- Defectos de montaje
- Problemas de acoples
- Problemas de piñones
- Problemas de sellos

- Giro de aceite
- Fenómenos críticos
- Resonancia
- Excitación aerodinámica
- Pulsaciones
- Excitación eléctrica
- Fuerzas electromagnéticas
- Desajustes generales y rozamiento.

2.11.2 Variables de Proceso

Para determinar y mejorar los rendimientos de las máquinas, hay que controlar no solo los parámetros de vibración, sino que se pueden controlar otras variables igualmente importantes que se denominan "variables de proceso" las cuales son medibles, y proveen la información concerniente a toda la unidad [48].

Las variables de proceso principales son:

- Temperatura
- Presión
- Flujo o caudal
- Amperaje
- Potencia, etc.

Sin embargo, lo que realmente interesa es evaluar la condición mecánica de funcionamiento de la unidad y los parámetros que más se usan son:

- Vibración
- Temperatura
- Posición relativa de los componentes móviles con respecto a los estáticos.

Las variables de proceso, serán por lo tanto correlacionadas para lograr una protección efectiva de las máquinas, con base a la predicción de las causas de los daños. Cuando se instalan monitores de vibraciones estos adicionalmente, traen los monitores para las otras variables de proceso. Normalmente se controlan:

- Vibración
- Frecuencia
- Angulo de fase
- Forma de vibración
- Modos de vibración
- RPM
- Temperaturas

- Excentricidades
- Posición de axial
- Expansión de carcazas y diferenciales.

Una unidad protegida con la instrucción adecuada, genera la información necesaria, para definir realmente lo que ocurre en la unidad, y que acciones se requieren para corregir el defecto. Sin embargo el monitoreo puede ser controlado con computadores, que no solo procesan la información, sino que pueden generar los diagnósticos, emitir diagramas de Cascada, (ver Figura 7), diagramas Polares (ver Figura 8), diagramas de Bode y Nyquist que son de mayor importancia para los análisis, con lo cual se logra predecir hasta la fecha de la posible falla; y de esta forma se puede procesar la información y planificar la parada del equipo en armonía con producción.

2.11.3 Donde y Cuanta Vibración se Mide

Hay un gran número de áreas de la industria en las cuales se pueden utilizar las mediciones de vibración efectivamente, entre ellas se incluyen:

- Mantenimiento Predictivo, de la maquinaria de la planta, para incrementar la vida operativa de los equipos y reducir el tiempo de paradas inesperadas.
- Inspección de equipos nuevos, para asegurar que a la puesta en marcha, se reciben equipos en condiciones óptimas de operación.
- Control de Calidad de la producción, asegurando que el producto que sale, se entrega con las características deseadas.
- Solución de Problemas en la maquinaria, donde se ha detectado un mal funcionamiento.
- Verificación de los equipos, después de las operaciones de mantenimiento o de un OVERHAUL.
- Asistencia en la selección de las áreas de la planta para equipos críticos, que pueden ser afectados por fuentes de vibración externa.
- Asistencia en investigaciones e Ingeniería, para verificar los cálculos teóricos de diseño y detectar problemas vibratoriales en equipos nuevos.
- Apoyo en la comercialización, para demostrar que los productos que salen al mercado están operando dentro de las condiciones óptimas.

Dependiendo de la clase de industria y tipos de plantas, las mediciones de la vibración son de gran valor en algunas de las áreas anteriores [11].

Son pocas las plantas industriales que no se benefician de la medición de la vibración, en términos del aumento de la vida de la maquinaria, reduciendo los costos y esfuerzos hombre / hora en el mantenimiento. Sin embargo en la mayoría de los casos, no es económicamente justificable la medición de la vibración en todas las máquinas de la planta. Para unidades no-críticas, existen lo que son monitores-anunciadores de vibración VAM, que es un sensor de bajo costo, el cual opera con una batería cuya vida promedio es de cinco años. Este elemento VAM dispone de un circuito integrado el cual continuamente compara el nivel de la vibración con los límites aceptables, cuando la vibración es igual o superior al valor preestablecido, un LED (luz) se enciende anunciando a los operadores de la presencia de un problema, debido a la alta vibración.

Para unidades muy complejas, existen los sistemas "ON-LINE" con monitores que están continuamente evaluando los parámetros tanto de vibración, posición, temperaturas y variables de proceso. Es posible por lo tanto organizar las claves decisorias en un proceso paso a paso para llegar a la selección de los equipos y técnicas que mejor se acomoden a los requisitos de una planta específica. Tal acercamiento no es complejo y se apoya en la información relacionada de las máquinas de la planta y sus operaciones, la cual debe ser obtenida del dictamen de mantenimiento. Específicamente la información necesaria será:

- El conocimiento general de la confiabilidad de las unidades.
- El conocimiento de la importancia de cada máquina en la operación de la planta.
- El conocimiento de las características del diseño de cada máquina (velocidades, componentes vitales, tipo y localización de los rodamientos).
- El conocimiento de la política de mantenimiento en términos de beneficios obtenidos entre la producción, mantenimiento, horas-hombre y esfuerzo-hombre.

Con esta información se llegará al más efectivo programa de Mantenimiento Predictivo.

Un programa de análisis de vibraciones se basa de tres pasos básicos:

- **DETECCIÓN:** Es la fase de la verificación de la condición de la maquinaria, mediante un proceso de medición continua o periódica de la vibración. Se instalan transductores en varios puntos de la maquinaria donde puede obtenerse la información más útil. Un aumento de la vibración se usa para prevenir el problema que se está desarrollando, antes de que ocurra la falla. La tecnología moderna ofrece gran variedad de captadores, unidades de monitoreo y equipos de medición, a partir de los cuales se selecciona el tipo de protección que se desee.
- **ANÁLISIS:** Cuando las mediciones periódicas indican que existe algún problema, el análisis de las mediciones precisará la procedencia de una manera fácil, rápida y positiva. La desalineación, desbalanceo, engranajes o rodamientos defectuosos, causan vibración en forma única.

- **CORRECCIÓN:** Según los análisis y la severidad de la vibración los problemas se identifican e indican el tipo de corrección que se deberá programar. La severidad de ésta permitirá optimizar la productividad de las máquinas, prediciendo la fecha de parada de las mismas, corrigiendo la fuente del problema, procedimiento que reducirá los tiempos de mantenimiento, aumentando la disponibilidad de la planta.

Las Figuras 9 y 10 nos muestran los modelos de cartas que nos sirven para determinar la severidad de las vibraciones de maquinaria en general; estas son gráficas que relacionan la amplitud y la frecuencia con la gravedad del daño en el primer caso, y la aceleración y la frecuencia para el segundo caso [37].

2.11.4 Fuentes de Falla que Causan Vibración

Con pocas excepciones, la vibración es consecuencia de defectos mecánicos. Además de las tres fuentes de falla más comunes en las máquinas, nombradas en los principios generales, existe diversidad de posibles causas de falla de menor importancia que producen vibración; de las cuales las que son más frecuente, serán comentadas a continuación de las tres primordiales [42].

2.11.4.1 El Desbalanceo. El desequilibrio de los elementos rotatorios o desbalanceo, es la causa más común que produce vibraciones. Consiste en una excitación que saca al rotor de su posición de equilibrio, temporal o permanentemente; la fuerza excitadora se transmite a través de los cojinetes a la carcasa y a la fundación.

La frecuencia de vibraciones producida por desbalanceo, es equivalente a la velocidad de rotación de la pieza 1*RPM, pero puede excitar resonancia a frecuencias armónicas. Hay muchas formas para que ocurra el desbalanceo, por lo cual el balanceo de un rotor presenta a menudo grandes problemas; puede girar suavemente a ciertas velocidades y presentar alta vibración a otras, especialmente a las críticas. Para lograr un buen balanceo dinámico se recomienda que la causa de la vibración sea solo el desbalanceo, que se puede determinar en el análisis detallado de la vibración; si el análisis revela la presencia de otros problemas estos deben corregirse primero.

2.11.4.2 El Desalineamiento. Es la segunda en importancia de las causas que originan vibraciones, y es probablemente responsable por más fallas de la maquinaria que cualquier otra causa, incluyendo el desbalanceo.

Hay dos clases de desalineamiento, el angular, en cuyo caso las dos líneas de los ejes correspondientes se cruzan para formar un ángulo, y el desplazamiento axial, en donde las líneas de los ejes tienen cierta separación y corren paralelamente; existe desde luego la posibilidad de que se presente una combinación de estos dos casos. El desalineamiento en los acoples causa fricción y deflexión que se transmiten por medio del eje a los cojinetes, donde se amplifica el defecto creando fenómenos secundarios. La frecuencia más característica es 2*RPM, pero 1*RPM también se presenta a menudo.

La vibración en sentido axial es el mejor indicio de la existencia de desalineamiento. Cuando esta vibración tiene un equivalente a la mitad o más del valor de las vibraciones radiales, puede determinarse la existencia del desplazamiento, o algún pandeo de los ejes, que según la amplitud de la vibración determina la severidad del defecto y la medida correctiva necesaria.

2.11.4.3 La Inestabilidad de Cojinetes. Conocida también como remolino de aceite o turbulencia de aceite, se presenta en aquellas máquinas que trabajan a velocidades muy altas y que están por lo general dotadas de chumaceras u otro cojinete hidrodinámico. La presión de aceite bombeado entre el eje y el cojinete hace que se formen turbulencias o remolinos que obligan al eje a efectuar movimientos oscilantes alrededor del centro de la chumacera, con una frecuencia aproximada a la mitad del número de RPM, que es la velocidad de giro de la película de aceite; la cual puede disminuir hasta un 5% por causa de la fricción. Así que la frecuencia característica de este defecto es de aproximadamente $0,45 * RPM$.

Las vibraciones por remolino de aceite pueden amortiguarse cambiando la velocidad de operación, y algunas veces los cambios en la presión o en la temperatura del aceite pueden resultar exitosos; pero el mejor medio de corrección del problema consiste en modificar el diseño de la chumacera. Otras soluciones obvias para reducir el problema son:

- Aumentar la carga del eje
- Reducir el área del cojinete
- Crear barreras rompe-olas que eviten el levantamiento del eje.

2.11.4.4 La Distorsión. Cuando se presenta una distorsión en la fundación, carcasa o parte interna de una máquina este defecto causa vibración de una manera indirecta, por generación de desalineamientos, o descompensación de cargas en los cojinetes. No existe una frecuencia específica para ese defecto, pero un ciclo por revolución $1 * RPM$ es la más característica.

2.11.4.5 La Resonancia. En este defecto no se genera vibración si no que se amplifican vibraciones de otras fuentes. Esta amplificación puede ser muy severa y crear situaciones de riesgo. Las fuerzas que dan origen a las vibraciones sufren cambios en intensidad, en su dirección, o en ambos factores. La frecuencia con que la fuerza varía, es llamada frecuencia excitatriz y es la que determina la frecuencia de las vibraciones; cuando esta frecuencia es igual a la frecuencia natural de la máquina, se produce el fenómeno de resonancia.

La frecuencia predominante de este problema es la frecuencia resonante de la fuerza excitatriz, pero en algunos casos puede presentarse interacción. El fenómeno de resonancia causa fallas en los equipos principalmente por fatiga.

2.11.4.6 Los Fenómenos Críticos. Son los problemas vibratorios ocasionados en los equipos cuando trabajan en velocidades próximas a la velocidad crítica, que es la velocidad a la cual un eje se encorva, y en esta velocidad, un desbalanceo minúsculo causa una gran deflexión debida a las altas fuerzas centrífugas. Se diferencia de la resonancia en que la vibración no es adelante y atrás, si no que el eje rota creando un arco, y por tanto puede quedar torcido. Esta vibración se

transmite a los cojinetes y a la carcasa causando daños en los sellos y en los mismos cojinetes. La amplitud de la vibración y la frecuencia depende en gran parte del diseño de cojinetes y soportes.

Las máquinas de alta velocidad pueden presentar uno o más fenómenos críticos si operan dentro de un rango amplio de velocidad, debido a la interacción entre rotor, cojinetes y fundación; sin embargo, una máquina puede operar a su velocidad crítica si las características de amortiguamiento del conjunto son suficientes. Lo más importante a recordar es que un fenómeno crítico es básicamente un desbalanceo que puede ser controlado.

En un problema de velocidad crítica se recomienda hacer lo siguiente:

- Poner los cojinetes lo mas cerca posible a los extremos de los ejes
- Aumentar la pérdida de potencia de los cojinetes
- Usar más de dos cojinetes
- Hacer los montajes y soportes tan macizos y rígidos como sea posible.

2.11.4.7 El Desajuste Mecánico. La vibración excitada por desajuste mecánico, o soltura, es una de las mayores causas de problemas, que se amplifica cuanto más alta sea la velocidad de operación.

La frecuencia de rotación del eje o parte floja determina la frecuencia de la vibración, y por tanto la causa del defecto. La dirección de la vibración identifica la pieza suelta.

Normalmente el desajuste da lugar a la presencia de mayores vibraciones de las que habría en otras condiciones; cualquier desequilibrio dinámico de pequeñas proporciones origina vibraciones intensas, cuya onda es de forma irregular, pues es la resultante de dos frecuencias, una con el valor equivalente a la velocidad de rotación y otra con el doble de ese valor.

2.11.4.8 El Rozamiento. La vibración resultante del rozamiento o fricción es causado por el contacto excesivo entre partes rotativas y estacionarias. Hay muchos tipos de rozamiento y la frecuencia puede ser de cualquier magnitud; una característica específica es la presencia de muchas frecuencias en el espectro. Por supuesto, el rozamiento no es la causa de los problemas si no más bien el resultado de algún otro defecto, como problemas de anclaje, distorsión térmica, ejes torcidos y muchos otros.

Si la fricción es continua, es muy improbable que se observe alguna vibración de características especiales; puede aparecer una frecuencia excepcionalmente alta, causada porque la fricción ha formado una frecuencia natural de excitación en el sistema. La superficie donde se efectúa el rozamiento es la única que puede identificar el defecto, ya que la textura producida es diferente a la del deslizamiento. Para evitar el problema se recomienda dejar suficiente tolerancia radial, o hacer la parte estacionaria de material más blando a la abrasión que la rotativa.

2.11.4.9 Los Problemas en Reductores. El desgaste de un diente de engranaje aumenta la carga dinámica en el diente lo cual ocasiona un desgaste más rápido. Específicamente, los sistemas de

engranajes con motor eléctrico están sujetos a vibraciones torsionales durante el arranque de la máquina, que aceleran el desgaste.

Los dientes desgastados causan vibración a frecuencias equivalentes al número de dientes por RPM y múltiplos. Para las frecuencias altas, las medidas de aceleración de la vibración son muy útiles; a medida que progresa el desgaste y se generan vibraciones de frecuencia más alta, el nivel de aceleración aumentará substancialmente, mientras que la amplitud mostrará muy poca vibración. Esto ocurre pues la amplitud de la vibración de frecuencia alta es muy pequeña.

2.11.5 Aislamiento de Vibraciones

Generalmente es mejor controlar la vibración en su fuente porque esto evita problemas en todos los receptores potenciales. Sin embargo, en los casos en que sólo es importante un número limitado de receptores y el control en la fuente no es práctico, puede ser preferible el control en el receptor. La reducción o eliminación de las vibraciones en la fuente tiene que ver típicamente con mejorar el balanceo dinámico del equipo de rotación o de vaivén; con la sustitución de los dispositivos que causan mayor vibración por los que causan menos vibraciones (por ejemplo las bombas centrífugas por las bombas reciprocantes), o por medio del cambio de las velocidades de operación, para eliminar las condiciones de resonancia. La reducción de los efectos adversos de las vibraciones en el receptor tiene que ver casi siempre con la sustitución de partes o procesos por otros menos sensibles a la vibración, o con la adición de rigidez o de masas, de manera inteligente, con el fin de eliminar la resonancia si está presente [50].

Por lo regular, el medio menos costoso para el control de la vibración resulta ser el aislamiento de la vibración. El aislamiento se consigue con la inserción de elementos suaves y flexibles en las trayectorias de propagación, para reducir las fuerzas y los movimientos transmitidos. A causa de la multitud de trayectorias que pueden comenzar en cualquier fuente y terminar en cualquier receptor, el aislamiento se lleva a cabo mejor cerca de la fuente o del receptor.

Normalmente después del análisis de vibraciones se aconseja buscar la fuente o causa de la vibración para ejecutar la corrección respectiva. Pero como hay muchos casos en los que las vibraciones son fenómenos inherentes a ciertos tipos de maquinaria, el aislamiento contra dichas vibraciones es la única solución posible.

El aislamiento contra vibraciones se puede aplicar en dos sentidos. Puede emplearse para aislar una máquina de las vibraciones que le son transmitidas por otras unidades, o puede usarse en una máquina para que esta no transmita sus vibraciones a otras máquinas o elementos que le rodeen.

Para controlar la amplitud de vibración de una máquina, frecuentemente se emplean masas auxiliares fijadas al sistema de vibración, estas masas auxiliares pertenecen a dos clases diferentes [48]:

- **Aislador Dinámico.** Consiste en una masa pequeña fijada por medio de un resorte al sistema. La característica básica está en que el resorte es calculado para que su frecuencia natural sea igual a la frecuencia de excitación. Así, el aislador dinámico crea un punto de no movimiento en el sitio donde se instala.
- **Aislador de Masa Auxiliar.** La reducción de vibración puede lograrse también, por medio del amortiguamiento que produce la adición de una masa auxiliar al sistema, que se basa en la ley de Newton ($F=m.a$). Por tanto, si la fuerza de excitación es constante, la aceleración de la vibración será reducida por el aumento de la masa.

En la práctica, para aumentar la eficiencia de reducción de vibraciones, se fija la masa auxiliar por medio de un soporte flexible y un disipador de energía. El soporte flexible (resorte) tiene como función principal absorber los picos de vibración y dejarlos salir lentamente. La disipación de energía se consigue con un amortiguador que puede ser de tipo viscoso o de Coulomb. Entonces es posible, por medio de la combinación de la masa auxiliar, el tipo de resorte y el tipo de amortiguador, reducir la vibración al nivel deseado.

El uso de los aisladores tiene el propósito, principal de reducir el efecto de las fuerzas dinámicas que son generadas por las partes móviles de una máquina. Un aislamiento efectivo no consiste solamente en interponer un material flexible entre dos partes de un sistema; una aplicación incorrecta puede agravar el problema. Para que tenga validez, un material de aislamiento debe ser flexible bajo las diferentes condiciones de operación de los equipos.

Aunque hay una gran variedad de materiales aisladores de vibración, los más aceptados son los resortes metálicos, los elastómeros y el corcho.

Los resortes metálicos se utilizan preferiblemente cuando la deflexión estática requerida excede de media pulgada. Son muy eficaces como aisladores mecánicos de vibración y su falta de amortiguamiento puede ser solucionada con la aplicación adicional de amortiguadores, y si fuere necesario de aisladores de ruido. Para su aplicación en montaje individual la relación entre el diámetro exterior del resorte y su altura debe ser al menos el 0.80.

Los elastómeros (diferentes tipos de cauchos), pueden ser montados de cualquier forma o vulcanizados a metal; están disponibles en diferentes grados de dureza, y tiene amortiguamiento inherente. Son los más versátiles de todos los tipos de aisladores. Debido a limitaciones en la disponibilidad de configuración, su aplicación se considera práctica para deflexiones estáticas menores de media pulgada.

El corcho que puede ser utilizado como aislador de vibraciones es el natural; más del 50% del volumen de éste, está constituido por aire aprisionado entre las células, lo que lo hace muy flexible. Bajo ninguna circunstancia debe utilizarse el corcho para aislamiento de vibraciones, en láminas de menos de dos pulgadas de espesor, por lo cual su uso no es muy popularizado.

2.12 LA TERMOGRAFÍA

2.12.1 Definición

La termografía es una técnica que posibilita a la visión humana ver a través del espectro infrarrojo. Las imágenes térmicas obtenidas a través de la termografía son llamadas termogramas; estos permiten un análisis cuantitativo para determinar temperaturas, así como la identificación de niveles isotérmicos. Termovisión significa, ver la temperatura de los objetos, debido a que todos los cuerpos irradian ondas electromagnéticas en función de su material y su temperatura. Con esta técnica, objetos estacionarios o en movimiento, pueden ser observados a distancias seguras lo que es de gran importancia, cuando altas temperaturas, cargas eléctricas, gases venenosos o humos están presentes.

Hacia 1965 fue introducido en el mercado el primer instrumento capaz de formar imágenes térmicas tanto de objetos fijos como en movimiento; desde entonces la termografía se afianzó como una técnica de gran valor y confiabilidad, en siderúrgicas, compañías de generación y distribución eléctrica, industrias de cemento, petroquímicas, etc., en sus programas de Mantenimiento Predictivo, para la detección de fallas actuales y potenciales en sus sistemas industriales [40].

2.12.2 El Infrarrojo

Al hacer mediciones para saber cual de los colores generaba mayor producción de calor en un termómetro, se observó que esto ocurre en la región que se extiende más allá del extremo rojo del espectro. A esta región se le llamó "rayos invisibles" y posteriormente se denominó "espectro infrarrojo". El límite inferior del infrarrojo coincide con el límite de percepción visual para el rojo mientras que el superior se confunde con las microondas en el campo milimétrico. La banda del infrarrojo es comúnmente dividida en cuatro sub-bandas cuyos límites son los siguientes:

- Infrarrojo próximo (0.75 a 3 micrómetros)
- Infrarrojo medio (3 a 6 micrómetros)
- Infrarrojo distante (6 a 15 micrómetros)
- Infrarrojo extremo (15 a 100 micrómetros).

2.12.3 Elementos de un Sistema Infrarrojo [17]

Los elementos básicos de un sistema infrarrojo son la unidad de cámara y la unidad de video (ver Figura 11).

La unidad de cámara es la que permite observar a través de la atmósfera, la radiación infrarroja emitida por el objeto ambiente sobre el cual se pretende efectuar la medición termográfica, y es la

encargada de transformar la radiación en una señal electrónica. La unidad de video procesa la señal electrónica y la convierte a su vez, en una imagen visual que se denomina termograma.

2.12.3.1 Unidad de Cámara. La radiación infrarroja que llega a la unidad de cámara es captada por el receptor óptico, transmitida al sistema de barrido y de esta al detector que la convierte en una señal eléctrica-electrónica.

La unidad de cámara está constituida por los siguientes componentes principales: (ver Figura 12)

- Receptor óptico: lentes, filtros y diafragma
- Mecanismos de barrido horizontal y vertical
- Detector y refrigerador del detector.

El receptor óptico esta compuesto por lentes y filtros, los cuales son manufacturados con materiales transparentes a la radiación infrarroja y cubiertos con revestimientos anti-reflexivos.

El diafragma también puede ser considerado parte del receptor óptico, y permite el control de la calidad de la radiación que llega al detector, y por consiguiente la operación en diversas fajas de temperatura.

El mecanismo de barrido está compuesto por dos prismas octogonales rotativos cuya rotación permite el barrido de las áreas en observación; uno hace el barrido vertical y el otro el horizontal.

La función del detector es convertir la energía radiante captada en una señal que es procesada en la unidad de video.

Los detectores más utilizados en sistemas modernos son:

- Indio - Antimonio para la faja espectral entre 3 y 6 micrómetros.
- Mercurio -Cadmio -Telurio para la faja espectral entre 8 y 14 micrómetros.

Estos detectores operan en bajas temperaturas y son montados en la base de un frasco Dewar con Nitrógeno líquido aproximadamente a -200 centígrados.

2.12.3.2 Unidad de Video. Contiene el procesador de señal, el monitor de video y los controles de selección y ajuste de la imagen. La función básica del monitor es presentar la información térmica detectada por la unidad de cámara. Esa presentación puede ser en blanco y negro, donde la continua graduación de tonos grises representan las diferentes intensidades de la radiación infrarroja captada. En las unidades de video a color las gamas de colores nos dan los diferentes grados de temperatura.

Las recomendaciones para la realización de Inspecciones Termográficas en Plantas Industriales comienzan con una frecuencia de seis meses, y luego se va ajustando a las necesidades particulares de cada instalación. Por lo tanto, las condiciones de operación de cada planta una vez establecida

esta metodología determina la frecuencia más aconsejable, al evaluar si las anomalías encontradas en la inspección anterior fueron corregidas. El establecimiento de un adecuado programa de inspecciones Termográficas periódicas, no sólo permite mantener un completo control de las fallas sino que establece una permanente interventoría o control directo de los trabajos internos o externos, calidad de repuestos, inventarios, etc. Permita además, racionalizar los recursos físicos y humanos en la realización de los trabajos predictivos.

2.12.4 Aplicaciones de la Termografía

La termografía tiene en Mantenimiento Predictivo cuatro campos principales de aplicación [17]:

2.12.4.1 Inspección de Sistemas Eléctricos. La utilización de la termografía en los sistemas eléctricos, ayuda a evitar las interrupciones en el suministro de energía, y permite el análisis total de los sistemas incluyendo generación, transformación, sub- estación, distribuciones y equipos de consumo.

Los componentes eléctricos pueden oxidarse, creando una resistencia al paso de la corriente eléctrica, y la energía disipada en forma de calor provoca una elevación de la temperatura de los mismos. Así la identificación y clasificación del componente defectuoso es hecha por la diferencia entre su temperatura y la del ambiente. La inspección eléctrica debe ser llevada a cabo en los periodos de demanda y en horas no soleadas para evitar el calentamiento solar; los componentes defectuosos son entonces resaltados como puntos calientes aislados, que según su gradiente de temperatura determinan la severidad del daño. Una guía generalizada para sistemas eléctricos a la intemperie, podría indicar que una elevación de temperatura hasta de 10 grados centígrados implicaría una reparación en mantenimiento normal; de 10 a 30 centígrados una reparación en la primera oportunidad, y de más de 30 centígrados una reparación inmediata.

Este mismo tipo de inspecciones de los sistemas eléctricos es igualmente provechoso en las industrias, como una herramienta importante del Mantenimiento Predictivo.

2.12.4.2 Inspecciones aplicadas en Siderúrgicas. Una importante característica en el uso del hierro y del acero es el gran número de procesos envolviendo calor en gran escala; tales procesos son efectuados en equipos de gran tamaño con recubrimientos adecuados. La inspección de refractarios y aislamientos térmicos se basa en que en un proceso de régimen térmico permanente habrá una distribución térmica en su superficie que es función directa de la conductividad térmica en las paredes del recipiente. La termografía por tanto, permite la identificación de fallas en el revestimiento de altos-hornos, regeneradores, chimeneas, y carros torpedos, y posibilita la identificación de fallas en el refractario o aislamiento térmico en calderas, reactores, tanques y conductos aislados.

La inspección de hornos y reactores es hecha generalmente con la intención de constatar el estado general del refractario, y para la determinación de puntos calientes provocados por el menor espesor del mismo o la falta de un aislamiento térmico adecuado.

En chimeneas y ductos de conducción de gases de combustión ocurre el desgaste del refractario por la acción combinada de la temperatura y de agentes químicos. La inspección normalmente es efectuada para constatar el estado del refractario y la ocurrencia de pérdidas en el mismo.

En tanques y ductos aislados, la termografía posibilita la localización de puntos de cambio de calor y la constatación de las condiciones generales del aislamiento, lo que refleja directamente en el rendimiento del proceso.

2.12.4.3 Inspecciones de Hornos. En hornos la inspección interna es usualmente efectuada para la comprobación de las tubulaciones por donde circulan los productos que deben ser calentados. Cuando los metales empleados en el interior de los hornos fueren aleaciones tratadas, la temperatura absoluta pasa a ser de gran importancia para el estudio de la resistencia mecánica y la corrosión. Los puntos sobrecalentados aparecen en el termograma indicando una elevación de temperatura que puede ser provocada por depósitos de carbón en el interior de los tubos, o depósito de óxido en la superficie de los mismos.

En los hornos para la fabricación de cemento, por la pérdida del material refractario se presenta en la superficie las llamadas "manchas rojas" que suelen ocasionar graves daños. Con alguna frecuencia ocurre acumulación del producto en determinada área ocasionando una reducción de diámetro del horno denominada "anillos calientes". La termografía presta una invaluable ayuda en la detección de estos dos fenómenos de una forma inmediata con la consiguiente reducción de los costos de mantenimiento.

2.12.4.4 Conservación de la Energía. La termografía tiene también una importante aplicación en lo referente a la conservación de la energía eléctrica, térmica y mecánica.

Los contactos deficientes, la pérdida de capacidad de aislamiento, la corrosión, las sobrecargas y la pérdida de conductividad de los elementos eléctricos, conlleva a fugas de corriente y aumento de la resistencia al paso de la misma, lo que representa una pérdida de energía disipada casi siempre en forma de calor y manifestada con un aumento de la temperatura. La termografía permite determinar el aumento precoz de la temperatura de funcionamiento, disminuyendo mediante acción correctiva las pérdidas de energía disipada.

En los sistemas térmicos de vapor uno de los elementos que más pérdida ocasiona por su mala operación son los purgadores; su función es permitir la salida de condensado, impidiendo la salida de vapor. Como el condensado está siempre a la temperatura mas baja que el vapor, debe existir un gradiente de temperatura en un purgador que funcione normalmente. La termografía descubre la ausencia de este gradiente indicando la necesidad de una reparación o sustitución inmediata.

En cuanto a la energía mecánica la presencia de sobre- calentamiento de los mecanismos en movimiento suele ser una señal inequívoca del mal funcionamiento, sobretudo en las chumaceras y rodamientos. La termografía suele prestar una gran ayuda en la detección de estos recalentamientos y en el análisis de la gravedad de los problemas.

2.13 OTROS SISTEMAS PREDICTIVOS

2.13.1 Prueba de Líquidos Penetrantes

Se emplea esta prueba para detectar defectos tales como poros, grietas, cavidades en la superficie de una pieza y otros defectos similares. Una condición previa es que las fallas empiecen en la superficie de trabajo. Es imposible detectar fallas por debajo de las superficies con el método de líquidos penetrantes, aún cuando la distancia sea de sólo una fracción de milímetro. Por medio de inmersión, rociado o pintura, se aplica una solución de tinta en la superficie del objeto, el cual entra en las fallas por acción capilar. Las fallas entonces se hacen visibles mediante la aplicación de un líquido revelador. La tinta se difunde desde las fallas a la película absorbente del revelador y se hace visible debido al contraste de color, ya que la tinta es roja y el revelador es blanco. Para todos los métodos de líquidos penetrantes, el procedimiento se realiza en los siguientes cuatro pasos [25]:

- Las partes a inspeccionar se limpian de polvo completamente, y particularmente de aceites y grasas residuales; lo mejor es hervir las partes en un baño de limpieza o lavarlas con un solvente como la acetona y luego secarlas completamente.
- Después de la limpieza y el secado sigue la penetración real, esto es la aplicación de la solución de tinta. Es conveniente sumergir completamente las partes pequeñas en la tinta, y en las partes grandes la tinta se puede aplicar por rociado con aerosol o pistola, o pintándolas con brocha. La tinta forma una capa en el objeto y gradualmente entra en todas las fallas que empiezan en la superficie. El tiempo que toma para penetrar es de 15 a 20 minutos.
- Durante el proceso de limpieza intermedia se lava el objeto, con agua a una presión que no exceda de 2 bar, para quitar la tinta de la superficie. Sin embargo, no se quita la tinta que ha penetrado en las fallas superficiales.
- Finalmente los indicadores de falla tienen que revelarse. Esto se hace aplicando un agente de contraste absorbente, usualmente de color blanco, ya sea en forma de polvo o de un líquido de secado rápido. Entonces el revelador puede extraer algo de la tinta que ha penetrado dentro de la falla. Este componente se difunde lateralmente y presenta al espectador una colección de indicadores de falla que no pueden pasar desapercibidos. El ancho de estas indicaciones varía con la cantidad de tinta que ha entrado en la falla, y con las grietas de acuerdo a su ancho y profundidad. De esta forma es posible calcular el tamaño aproximado de la falla.

2.13.2 Prueba de Partículas Magnéticas

Todos los materiales ferromagnéticos pueden examinarse por medio de esta prueba. La pieza de trabajo tiene que ser magnetizada o puesta dentro de un campo magnético fuerte y las partículas magnéticas aplicadas a él en forma de polvo o fluido con las partículas magnéticas en suspensión.

Si hay fallas superficiales en la pieza de trabajo, esto interrumpirá las líneas magnéticas de fuerza, siendo formados polos secundarios en estos puntos, a los cuales se adhieren partículas y así hacen visibles las fallas a simple vista.

La dirección de magnetización es un factor muy importante para la detección de fallas. La formación mencionada de polos secundarios en los puntos en donde la superficie se interrumpe, solo toma lugar cuando la separación del material está perpendicular o al menos 45 grados en la dirección del campo magnético. Las fallas que corren paralelas a las fuerzas magnéticas no son un obstáculo, así no hay ningún disturbio de las líneas de fuerza y no hay ninguna formación de los polos secundarios, esto es, no pueden detectarse tales fallas. Si hay fallas, se harán visibles en la otra dirección de magnetización.

El campo de fuerza también es un factor importante para comprobar la presencia de fallas. Pero como no es fácil adivinar el campo de fuerza correcto para obtenerlo tiene que revisarse la sensibilidad de un caso a otro mediante una pieza de prueba especial, conocida como la pieza de prueba Berthold. Si la indicación que se requiere aparece en la pieza de prueba, el campo de fuerza será suficiente y la dirección de magnetización será correcta en el objeto de prueba real.

Se puede producir el campo magnético en varias formas. Para las piezas de trabajo delgadas con una área de superficie grande un imán permanente de herradura puede dar los resultados acertados. Si se necesita un campo más fuerte, en muchos casos es útil un electroimán con yugo. En fundiciones grandes, una corriente alta usualmente se pasa a través de la pieza de trabajo por medio de electrodos de contacto, para establecer el campo magnético; con este método la demanda de las direcciones de magnetización a ángulos rectos es fácil de cumplir, ya que los imanes (o electrodos) se giran simplemente hasta 90 grados y son colocados en los mismos puntos.

Para las piezas de trabajo largas y delgadas tales como vástagos, se adapta el procedimiento de tal forma que queden sujetos entre zapatas de contacto en sus extremos y se pasa una corriente a través de su longitud. Esto resulta en una magnetización, con un campo girando alrededor del eje longitudinal, con el cual las fallas longitudinales en la pieza de trabajo pueden ser detectadas. Para detectar las fallas transversales se necesita un campo que corra por el eje longitudinal del objeto. Esto se logra colocando un solenoide sobre el objeto o, para objetos más grande envolviendo un cable alrededor del objeto.

Para objetos de formas complicadas a menudo es necesario combinar diferentes métodos de magnetización.

Los medios de indicación tienden también a diferir según el propósito de la prueba y de la instalación. Algunas veces, para obtener una sensibilidad mayor de la indicación, se usan polvos fluorescentes, los cuales son expuestos a la luz ultravioleta, brillan intensamente y así son fáciles de reconocer.

Las superficies cubiertas normalmente no son obstáculo para una prueba de partículas magnéticas. Si la cubierta es pintura, puede ser difícil asegurar un buen contacto eléctrico con los electrodos

de magnetización. Por otra parte, el recubrimiento con cromo o cadmio no impone ninguna restricción para efectuarse la prueba.

La detección de fallas por una prueba de partículas magnéticas, se limita a aquellas fallas que se encuentran inmediatamente sobre la superficie. Pero no es necesario que la falla exhiba una abertura hacia la superficie.

2.13.3 Prueba de Radiografía

El método de prueba no destructivo que se conoce por más tiempo es el que emplea radiación de rayos X o rayos gamma. Con este método, los rayos de onda corta se generan por una fuente de rayos X o rayos gamma colocados antes de la pieza de trabajo, la penetran y revelan una película colocada detrás.

En la película revelada cualquier falla presente, tales como poros, cavidades e incrustaciones, es visible como manchas oscuras o parches, debido al debilitamiento de la radiación, es del tamaño original y está en su lugar. Aparecen grietas en la película cuando la grieta real corre paralela a la dirección de radiación. Pero si la grieta está perpendicular a la dirección de la radiación, no se reproducirá en la película, ya que la energía radiante no se afecta notablemente por el ancho de la grieta. El factor dominante para la distinción de la falla es la calidad de la imagen de la radiografía, la cual se determina por el contraste, difusión y grano.

El contraste se determina por la energía de la radiación. Cuanto mayor es la energía, menor es el contraste.

La difusión se determina por la falta de una definición geométrica, regida por el arreglo que se eligió para la prueba, y la difusión interna, la cual es una función de la energía radiante, sin importar el tipo de película que se use.

El grano es una propiedad de la película que se use. Cuanto más fino sea el grano de la película, mejor será el contraste.

El mejor reconocimiento de la falla se obtiene con una energía baja de radiación, poca difusión y el uso de una película de grano fino. Pero debe tomarse en cuenta que el tiempo de exposición es considerablemente más largo con el consiguiente aumento en los costos de la prueba.

2.13.4 Prueba de Ultrasonido

Este método ha aumentado de importancia en los últimos años, y a medida que pasa el tiempo se acepta cada vez más en las normas internacionales de pruebas [42].

Las ondas ultrasónicas son ondas de sonidos, es decir vibraciones mecánicas con frecuencia arriba del límite del oído humano por encima de 25 KHz. Estas ondas son adecuadas para probar piezas de trabajo ya que poseen una muy alta penetración y que se propagan linealmente. La velocidad de propagación depende del espesor del material que se examina y del tipo de ondas. Se hace una distinción entre ondas longitudinales las cuales son ondas de presión que se usan cuando el ángulo de incidencia es de 90 grados, y las ondas transversales, las cuales son ondas tangenciales que entran formando un ángulo con la pieza de trabajo.

Cuando estas pasan a través del material, las ondas ultrasónicas se absorben en un grado que varía con el material. La magnitud de esta absorción depende del material, del grano del material que se examina y la frecuencia que se emplea. Los materiales de grano grueso tienen que probarse a frecuencia más baja que los materiales de grano fino. Pero no se puede bajar la frecuencia arbitrariamente, ya que en cuanto más baja es la frecuencia, hay menos posibilidad de detectar las fallas.

La prueba de ultrasonido se ejecuta normalmente por el método de impulso de eco. Esto significa que el mismo vibrador que emite ondas ultrasónicas cuando es energizado eléctricamente, recibe también los impulsos reflejados por la superficie opuesta y los convierte en señales eléctricas, las cuales se evalúan entonces con la ayuda de un osciloscopio catódico. Si hay una falla entre las dos superficies paralelas, los impulsos ya son reflejados por la falla y, se reciben y evalúan en tiempo más corto. De esta forma es posible determinar la profundidad de la falla con bastante certeza.

El tamaño de la falla se determina por la cantidad de energía ultrasónica reflejada por la falla. Teóricamente es posible determinar el tamaño de la falla dentro de una décima de milímetro. Sin embargo, esto implica que la falla deberá tener una superficie que refleje igual que la pieza de trabajo, y que la superficie de falla esté exactamente perpendicular a la dirección de las ondas.

En la práctica se ha encontrado muy conveniente el usar pruebas ultrasónicas como un medio preliminar y de inspección. Si, después de examinar los resultados de la prueba ultrasónica, todavía hay algunas dudas con respecto al tipo de falla y de su tamaño, la pieza en cuestión podrá ser sometida a una prueba de radiografía. Con el tiempo la persona que ejecuta las pruebas ultrasónicas adquirirá suficiente experiencia para saber como determinar el tipo y tamaño de las fallas de los resultados de las pruebas ultrasónicas.

No solo las fallas en partes de máquinas conducen a descomposturas, sino que también, por ejemplo, la reducción del espesor de pared debido a la abrasión o corrosión, o a un incremento de vibración de partes giratorias que a menudo causan interrupciones no programadas durante la operación.

Se puede llevar a cabo fácilmente mediciones del espesor de pared residual usando el método ultrasónico descrito anteriormente. Actualmente hay unidades de peso ligero en el mercado, las cuales son muy fáciles de operar, y permiten medir confiablemente el espesor de pared desde aproximadamente 1 mm en adelante a temperaturas hasta de 500 grados centígrados. Las lecturas

aparecen directamente en forma digital para no molestar con la interrupción de una indicación sobre una pantalla fluorescente.

2.13.5 El Método por Impulso de Choque

Los rodamientos de bolas y rodillos están entre los elementos más comunes e importantes en una maquinaria giratoria. Todo elemento rodante o rodamiento tiene una vida limitada que es influenciada fuertemente por la instalación, condiciones de operación y el mantenimiento que recibe. La fiabilidad, eficiencia y seguridad de la máquina, depende del funcionamiento apropiado de los rodamientos. Adicionalmente la fatiga del metal es una causa importante de su desgaste y falla.

Un método basado en el monitoreo del impacto mecánico causado por el daño en los rodamientos y condiciones de operación, conocido como "Shock Pulse Method" está actualmente disponible y se usa ampliamente. Esta técnica permite que la condición del rodamiento puede ser probado a lo largo de la vida útil, sin estar influenciada por el diseño, tamaño o vibración de la máquina [31].

El método SPM detecta el desarrollo de una onda de choque mecánico causada por el impacto entre dos masas. En el momento del impacto, ocurre un contacto molecular y se desarrolla una onda de compresión (choque) en cada una de las masas.

El método SPM se basa en los eventos que ocurren en la masa durante el tiempo extremadamente corto después de que las primeras partículas de los cuerpos en colisión hacen contacto. Este periodo es tan pequeño que no permite una deformación detectable en el material. El contacto molecular resulta en una aceleración de partículas infinitamente grande en el punto de impacto.

El sistema SPM usa un acelerómetro piezoeléctrico para medir el impacto mecánico o impulso de choque sin ser influenciado por otros factores tales como vibración, medio ambiente y ruido.

Las superficies que trabajan del rodamiento siempre tienen un cierto grado de rugosidad. Cuando el rodamiento gira, la rugosidad superficial o un defecto superficial causará impactos mecánicos. Estos impactos causan impulsos de choque; la magnitud de estos impulsos depende de la condición de la superficie y de la velocidad de rotación del rodamiento.

Cuando se usa el método SPM, es posible medir los impulsos de choque causados por la rugosidad superficial y así seguir el desenvolvimiento de la condición del rodamiento desde que se instaló nuevo, a través de las varias etapas de deterioro, hasta que finalmente tiene que ser reemplazado.

Existen dos métodos de monitoreo posibles:

- Monitoreo Manual
- Monitoreo Continuo.

Para el monitoreo manual, existen instrumentos de prueba portátiles, compuestos básicamente por un medidor manual de baterías.

Los sistemas de monitoreo continuo consisten en transductores permanentemente instalados, detectores prefijados y centralizados en tableros con alarmas.

El monitoreo de las condiciones del rodamiento con el método SPM tiene muchas aplicaciones. El criterio económico determinará que rodamientos deberán ser monitoreados, pero la calidad y seguridad frecuentemente son también factores que se deben tener en cuenta.

La habilidad para conocer los valores de choque permite que se puedan revisar los rodamientos recién instalados, proporcionando un factor de control de calidad. Un montaje incorrecto causará una sobrecarga interna dentro del rodamiento, que origina lecturas elevadas. Esta capacidad cuando se usa por los fabricantes de máquinas giratorias, permite detectar las áreas con problemas potenciales antes de la entrega, lo cual es esencial para la fiabilidad futura y el servicio que se exige a la máquina.

El método SPM es una ayuda sencilla y práctica para el mantenimiento normal y las reparaciones. En lugar de una descompostura o medidas preventivas tales como un reemplazo de rodamiento prematuro, es posible planear actividades de mantenimiento con respecto a la condición de la máquina actual. La existencia de problemas en las condiciones de operación puede ser determinada con precisión.

El monitoreo de las condiciones del rodamiento reduce los paros de máquinas no programados. El método SPM detectará daños incipientes que permiten planear la reparación. Esta característica es de gran importancia en las industrias de proceso las cuales tienen pocos paros programados y en donde cualquier paro extra puede causar pérdidas de producción considerables.

2.13.6 Prueba de Presión Sonora

A menudo, los problemas en los equipos y las máquinas industriales se reconocen solamente como "ruido". En muchos casos, son de una magnitud mucho mayor que el trastorno de las vibraciones de la máquina o del equipo mismo.

Para determinar el alcance de las fuerzas relacionadas con estos trastornos, para que pueda tomarse medidas para proteger los equipos contra las mismas, las presiones sonoras tienen que convertirse en valores de desplazamiento o de aceleración.

Además, los trastornos de vibraciones con mayor frecuencia se registran empleando instrumentos de mediciones sonoras. El nomograma de la Figura 13 puede emplearse para calcular rápidamente las fuerzas de aceleración resultantes de niveles especificados de presiones sonoras y determinar los desplazamientos de las frecuencias a que se registran las presiones sonoras [6].

Con esta información, puede determinarse los tamaños y características de los sistemas de montaje del aislamiento empleado para proteger los equipos en ambientes vibratorios. Estos sistemas deben incluir elementos elásticos altamente amortiguados. La ubicación de los elementos elásticos es de suma importancia para lograr una protección óptima.

Cuando se sabe cuál es el grado de presión sonora (en decibeles), pueden usarse las escalas I y II en el nomógrafo para determinar la presión sonora RMS en psi. Por ejemplo, si el grado de presión sonora es 130 db, entonces la presión sonora RMS es 0.0092 psi.

La relación de las escalas I y II se basa en la presión de referencia empleada comúnmente, de 0.00002 pascal. Si se emplea otra referencia de presión al registrar el nivel de presión sonora (SPL), debe usarse la ecuación para determinar la presión sonora RMS. La solución se obtendrá en pascal y esta cifra tendrá que convertirse a psi multiplicando por 0.000145. El nomógrafo puede usarse entonces para determinar las magnitudes de la vibración.

Las escalas II y IV se usan para determinar la aceleración de una presión sonora específica RMS actuando en una masa particular, como sigue:

$$F(P1) = M.a$$

En la que F es la presión sonora RMS y M la masa del equipo.

Cuando se conocen la aceleración y frecuencia a las cuales se registró el nivel de presión sonora, se usan las escalas IV y VI para determinar la amplitud doble (en pulgadas) con base en la ecuación:

$$DA = g/(0.0511 f^2)$$

2.13.7 Análisis de Lubricantes

La lubricación es de fundamental importancia en el mantenimiento de la maquinaria. El análisis del aceite usado es una tarea de invaluable ayuda cuando se prevé fallas, y de reducir costos se trata, puesto que los lubricantes pueden indicar el estado en que se encuentra la máquina y mostrar las fallas que se están presentando.

La lubricación es básica dentro del funcionamiento correcto de cualquier maquinaria. Por esto los lubricantes sufren contaminación, oxidación y pérdida de aditivos. Existe una gran cantidad de pruebas físicas y químicas que dan una información muy útil sobre las características de los aceites lubricantes. Las pruebas químicas muestran la variación de las características originales, como viscosidad, gravedad específica, punto de inflamación, punto de combustión, punto de fluidez, número de neutralización etc. Las pruebas de laboratorio permiten establecer las condiciones generales en que se encuentra el lubricante y la máquina, permitiendo detectar las fallas [48].

El análisis del aceite en servicio, se hace con los siguientes objetivos:

- Determinar la condición del lubricante.
- Asegurar que el tipo de aceite y la frecuencia de cambio sean adecuados.
- Predecir fallas en los equipos y prevenir daños permanentes.
- Incrementar la eficiencia de la maquinaria.
- Reducir costos directos de mantenimiento.

Las pruebas o ensayos a los lubricantes se pueden dividir en dos grupos, de acuerdo al tiempo en que se realizan:

- Pruebas en el momento de recibirlos
- Pruebas periódicas durante el trabajo.

Cuando se compran y reciben, los lubricantes deben someterse a una serie de pruebas que muestran si las características del lubricante cumplen los requerimientos de la máquina.

Las pruebas a lubricantes en períodos de trabajo, se deben tomar inmediatamente se detenga el mecanismo, para asegurar que la muestra sea realmente representativa, ya que si se toman muestras de la parte superior del cárter o depósito después de que la máquina ha estado parada por algún tiempo, ciertos contaminantes, tales como agua, mugre, partículas de metal, etc., se pueden haber sedimentado por lo que el aceite parecerá más limpio de lo que realmente está.

Algunas pruebas comunes que se le hacen a los lubricantes para que nos ayuden a detectar fallas en las máquinas son [42]:

- **Viscosidad.** Indica el cambio de la resistencia del líquido a fluir por contaminación o por oxidación inestable. Para hacer la prueba se usa un viscosímetro Say-Bolt, Cinemático, Engler, o Digital. Con ella se puede conocer, vida útil, productos de oxidación y polimerización, presencia de partículas en suspensión. La viscosidad puede ser afectada por factores físicos o químicos. La disminución de la viscosidad se debe a la mezcla con combustibles o solventes; el aumento se debe a la presencia de sólidos en suspensión.
- **Tensión interfacial.** Indica el grado de resistencia que ofrece al separarse el agua y el aceite. La presencia de cuerpos polares, contaminantes, aditivos y productos de la degradación propia del aceite, rebajan la tensión interfacial.
- **Número de neutralización.** Este ensayo nos muestra los cambios relativos en el aceite bajo condiciones oxidantes. Los resultados obtenidos deben compararse con los de recepción y dependen de las condiciones de trabajo. Si los productos de la oxidación son ácidos se produce desgaste corrosivo en las partes que están siendo lubricadas.
- **Sedimentos metálicos.** Determina los elementos de desgaste contaminantes. A partir de la clase de sedimentos se puede determinar las fallas mecánicas. Por ejemplo, si existen sedimentos de cobre se puede predecir un anormal trabajo de cojinetes antifricción; de igual

forma, si aparecen sedimentos del material de los ejes se puede definir un rozamiento muy elevado.

- **Densidad y gravedad específica.** Pueden determinarse por medio de hidrómetros. El hidrómetro puede calibrarse para leer cualquiera de las tres propiedades, densidad, gravedad, gravedad API. Un incremento en gravedad específica indica, degradación o deterioro del aceite, presencia de insolubles, presencia de agua, o que se está utilizando un aceite de mayor gravedad específica. Una reducción en gravedad específica indica, dilución no combustible, o utilización de un aceite de menor gravedad.
- **Puntos de inflamación y fuego.** Las determinaciones del punto de inflamación, están relacionadas con los análisis de aceites lubricantes usados en motores de combustión interna donde puede presentarse dilución por combustible. Una disminución del punto de inflamación indica mezcla con elementos mas volátiles. Un aumento del punto de inflamación se debe a la presencia de elementos pesados y conlleva aumento de la viscosidad, también indica que los elementos volátiles se están evaporando.
- **Cenizas sulfatadas.** Cuando se compara el contenido de cenizas sulfatadas de un aceite, sirve para determinar el desgaste de las piezas que se lubrican y la entrada de partículas extrañas.
- **Análisis de absorción atómica.** El espectrofotómetro de absorción atómica es hoy en día una de las herramientas más útiles para el control de aceites lubricantes, y para la determinación de niveles de desgaste de equipos especialmente automotrices e industriales. La espectrofotometría tiene una amplia aplicación en los análisis de muestras de los aceites usados ayudando a determinar la presencia de metales en los aditivos por desgaste interno en un motor o equipo, los cuales son comparados con los límites permisibles de control.
- **Análisis infrarrojo.** Es una de las herramientas más efectivas para analizar el estado de un aceite usado. El cual nos permite comparar el espectro del aceite usado con el espectro de un aceite nuevo, permitiendo detectar cualitativa y cuantitativamente la diferencia causada por la presencia de nuevos grupos funcionales, tales como los correspondientes a la oxidación del aceite, agua, glicoles, productos de nitración, material soluble, combustible y otros contaminantes extraños a la composición básica del aceite. También nos muestra el desgaste que han sufrido los aditivos mediante la disminución en la intensidad de la banda espectral.

Los equipos de las más recientes generación han introducido en su diseño los últimos avances en micro-computación, permitiendo obtener altas resoluciones en los espectros y la capacidad de almacenar en memoria los parámetros analíticos requeridos, evitando al máximo los errores por parte del analista.

Un programa de muestreo y análisis de lubricantes no es un sustituto del mantenimiento planeado y bien ejecutado, pero si es un complemento importante para reducir costos de mantenimiento y tiempos de parada de los equipos.

3. ADMINISTRACIÓN DE SISTEMAS DE MANTENIMIENTO

3.1 DEFINICIÓN Y OBJETIVOS

La complejidad cada día mayor de los procesos productivos y la necesidad de aumentar en ellos su eficiencia, conlleva a la aplicación de la teoría administrativa en las actividades de mantenimiento, con lo cual se logra un mejor aprovechamiento de los recursos disponibles.

El objetivo principal de la administración es coordinar los medios sistemáticamente, para lograr un fin o fines comunes dentro de la empresa. Así el mantenimiento representa un organismo social que opera como cualquier empresa independiente pues cuenta con:

- Operaciones presupuestales o de manejo de fondos.
- Operaciones de productividad en la prestación de servicios.
- Operaciones de aplicación en la distribución de los servicios.
- Operaciones de conservación para la protección de los recursos humanos y materiales.
- Operaciones de registro y control estadístico de las actividades.

La administración de mantenimiento se define como un conjunto sistemático de técnicas que mediante la coordinación de cursos y estructuras organizacionales busca la obtención de un objetivo definido.

En el mantenimiento el objetivo es la conservación de los equipos y su protección, para que se sostengan operando eficientemente, y retardar el deterioro para alargar su vida útil. Así un sistema de mantenimiento verifica todo el ciclo de la administración, y sus fases permanecen continuamente cambiando, transformándose y desarrollándose, constituyéndose en un proceso cíclico administrativo.

3.2 FASES DE LA ADMINISTRACIÓN

Las fases de la administración del mantenimiento son:

- Previsión
- Planeación
- Organización

- Integración
- Dirección
- Control.

Las tres primeras se consideran fases estáticas y son aquellas que por lo general originan gastos bajos; las tres últimas son consideradas fases dinámicas y son aquellas que generan gastos más fuertes.

3.2.1 Fase 1. Previsión

En la primera fase se busca determinar el objetivo o la finalidad prevista mediante la investigación de los medios y el análisis de las alternativas.

Se puede sintetizar en la pregunta, que se puede hacer?. Básicamente las actividades que comprende son:

- Fijar objetivos, es decir definir el punto al cual están dirigidos los esfuerzos para satisfacer un deseo o necesidad.
- Investigar los medios para lograr los objetivos, que pueden basarse en experiencias pasadas, estadísticas o análisis matemático.
- Establecimiento de los diferentes cursos de acción, que surgen en el proceso de investigación para adoptar los medios encontrados.

3.2.2 Fase 2. Planeación

Esta fase analiza y estudia las alternativas para lograr los objetivos.

Se puede sintetizar en la pregunta, que se va a hacer?. Se puede definir como el conjunto de actividades y esfuerzos previos para determinar el curso de acción que ha de seguirse en el logro de los objetivos.

Esta fase comprende las siguientes etapas:

- Fijar políticas, o sea establecer principios que sirven para orientar las acciones y tomar decisiones.
- Elaborar procedimientos, que son los métodos o secuencias de las operaciones a realizar.
- Programar las actividades, que comprende la determinación y la duración de cada una de ellas.

- Elaborar presupuestos, a través de la determinación de recursos económicos necesarios con el fin de que las actividades se realicen.

3.2.3 Fase 3. Organización

Es la encargada de la coordinación de los elementos y recursos humanos. Haciendo la pregunta, como se va a realizar?. Se sintetiza el concepto de esta fase, definiéndola como la estructura de las relaciones que se deben dar entre los niveles de autoridad, funciones y obligaciones en una empresa, con el fin de hacer eficiente su operación.

Esta fase cuenta también con varias etapas que debe cubrir toda buena administración:

- Definición de funciones, que determina y aclara como puede dividirse y agruparse las actividades de cada puesto.
- Asignación de obligaciones, que determina la responsabilidad concreta de cada cargo.
- Establecimiento de jerarquías o niveles de autoridad, que define los niveles jerárquicos en el organigrama al igual que su relación formal de dependencia.

3.2.4 Fase 4. Integración

Esta fase tiene por objeto la incorporación de los recursos adecuados y necesarios para la realización de los planes preestablecidos.

Se puede sintetizar esta definición en la pregunta, con quien y con qué se van a realizar las actividades?.

En esta fase se distinguen las siguientes etapas en lo que se refiere a la integración de personal:

- Reclutamiento, o sea la obtención de candidatos a ocupar los puestos asignados en la organización.
- Selección de los candidatos idóneos, de acuerdo a las aptitudes y a su correspondencia con las funciones del cargo.
- La capacitación, que consiste en llevar a los candidatos al nivel de eficiencia requerida para el desempeño de sus funciones.
- El desarrollo, que consiste en la permanente preparación de las personas para ocupar puestos de mayor jerarquía.

Las etapas que constituyen la integración de los recursos materiales son:

- Determinación de las necesidades.
- Selección de los recursos más eficientes y económicos.
- Sistema de adquisición, de los recursos seleccionados por compra, fabricación, o adaptación.
- Instalación y conservación, de los materiales adquiridos en forma eficiente.

3.2.5 Fase 5. Dirección

Mediante la dirección se logra la adecuada ejecución y realización de las tareas; es decir esta fase es la que se encarga de conducir y hacer que el plan se lleve a cabo, con la organización estructurada mediante los elementos integrados.

Se sintetiza en la pregunta, como se van a conducir las operaciones?.

Esta es la única fase que no comprende etapas a seguir en orden secuencial, pero se debe tener en cuenta que para dirigir bien es necesario saber:

- Mandar
- Delegar
- Informar o comunicar
- Motivar
- Revisar y supervisar
- Controlar adecuadamente.

3.2.6 Fase 6. Control

Con el control se marcan las diferencias entre lo planeado y lo ejecutado. Esta fase se sintetiza con la pregunta, como se ha realizado? Es decir mide las desviaciones de la realidad con el plan original y las corrige.

Para poder llevar a cabo esta fase con efectividad, se debe observar las siguientes etapas:

- Establecimiento de normas o estándares, o sea fijar las bases contra las que se medirán los resultados.
- Establecimiento del sistema de control, o sea la manera en que la información de lo realizado será obtenida.

- Interpretación y análisis de los resultados obtenidos.
- Toma de acciones correctivas, oportunas de acuerdo con la desviación presentada, con el fin de llevar los resultados al plan de trabajo trazado por programación.

3.3 PLANIFICACIÓN DEL TRABAJO DE MANTENIMIENTO

3.3.1 Conceptos Básicos

La planificación fue definida como el conjunto de esfuerzos previos y actividades que surgen para determinar el curso de acción a seguir con la finalidad de lograr unos objetivos determinados. Estos esfuerzos pueden ser muy variados, pero comprenden entre otros, la definición de las políticas de mantenimiento, los procedimientos para realizar los trabajos y primordialmente, la programación eficiente de las actividades a realizar en función económica [24].

Las políticas son planes generales de acción o reglas fundamentales que sirven como guía para reflexionar y actuar; ameritan interpretación y requieren buen juicio e iniciativa para el logro de los objetivos.

Los objetivos son considerados planes en cuanto tiene que ver en el desarrollo de actividades futuras, desde luego forman parte de la planeación.

Los procedimientos son planes minuciosos y detallados para llevar a cabo las políticas; son el resultado de un planeamiento cuidadoso con el patrón prefijado que se ha de seguir, pueden enlazar actividades que se refieren a la maquinaria, al personal y a los registros. En tanto prescriban la secuencia y la forma en que cada actividad debe ser realizada constituyen un elemento de control. Los procedimientos traducen las políticas a un lenguaje administrativo claro y detallado.

Los programas son planes de uso único, que regulan la marcha de las actividades a realizar, en cuanto se refiere a secuencia y tiempo de duración. Un programa efectivo controla el trabajo para alcanzar un equilibrio entre los diversos factores que influyen en el mismo.

3.3.2 Proceso de Planeación

Existen diferentes reglas aplicables en un proceso de planeación, pero básicamente se debe seguir una serie de pasos secuenciales para llevar a cabo una planeación efectiva de las actividades de mantenimiento, estos son:

- Determinar las necesidades de los equipos, que pueden ser originados por uso de bitácoras, reporte de frecuencias de falla, estadísticas de comportamiento, o comunicación verbal de los operadores.
- Diagnosticar las causas de falla, mediante investigación y análisis.
- Planear las soluciones alternativas y proponer las acciones correctivas, mediante listado de las actividades.
- Programar lo planeado con la secuencia de actividades.
- Evaluar el programa en carga de trabajo.
- Confrontar la carga de trabajo con la fuerza de trabajo.
- Informar, y controlar el programa con producción.
- Elaborar la reprogramación si fuere necesario.

3.3.3 Planificación del Grado de Diligencia

El término - Grado de diligencia del mantenimiento - se refiere a lo que el departamento de mantenimiento debe hacer para el logro de su objetivo fundamental [2].

El medio más efectivo de planificar el grado de diligencia varía de acuerdo con el tamaño y las funciones de cada departamento. Sin embargo si se aplican métodos rudimentarios, serán pocas las oportunidades para lograr un programa de mantenimiento efectivo en costos.

Existen tres aspectos globales a considerar para toda buena planificación:

- Los enfoques primarios
- Los programas comprensivos
- La integración del trabajo.

Dentro de los enfoques primarios se trata de descubrir el grado de diligencia en relación con las clases de trabajo y el cuándo debe hacerse. Las principales técnicas que pueden aplicarse son:

- Asignación de turnos específicos para ciertas clases de trabajos.
- Identificación de las operaciones repetitivas en los equipos.
- Empleo de un archivo de trabajos en ejecución, para determinar quién esta trabajando y en qué.
- Aplicación de un control de ordenes pendientes, para determinar cargas de trabajo.

El informe de ordenes pendientes puede emplearse para identificar los trabajos que pueden resultar críticos y la necesidad de una planificación adicional.

Dentro de los programas comprensivos para la planificación del nivel de mantenimiento, se examinan todos los trabajos para la asignación de los recursos, y con la información sub-siguiente se puede comparar los trabajos ejecutados, con el grado de diligencia planeado.

Algunos de los métodos de más éxito que se emplean como programas comprensivos son:

- Asignación de costos
- Asignación de horas de trabajo
- Equivalencia de trabajadores y
- Integración de operaciones.

La planificación por asignación de costos puede ser un enfoque altamente efectivo, mediante la descomposición de los costos totales en componentes significantes, y un método adecuado de control de los gastos verdaderos.

Un sistema de asignación de las horas de trabajo es similar al enfoque de asignación de los costos; sin embargo la unidad de medición de los costos es tiempo en vez de dinero. Este proceso es particularmente valioso donde la mayor parte del trabajo se efectúa con personal de la empresa. La descomposición de horas de trabajo puede emplearse para análisis de tendencias, como para identificación de las desviaciones de las asignaciones planeadas.

Una descomposición de equivalencia de trabajadores es una variación del método de horas de trabajo. La unidad de medición es el número de trabajadores derivado de las horas de trabajo en un determinado lapso de tiempo. Este método es particularmente valioso cuando se emplea en los trabajos una cantidad considerable de horas extras y puede justificar la contratación de personal adicional.

Otra faceta de la planificación comprensiva del mantenimiento es la integración de las actividades propias con otras operaciones de la empresa, principalmente las de producción. Un departamento de mantenimiento no puede operar aislado, si no que requiere una coordinación estrecha, con sus "clientes" para la efectiva planificación de sus actividades.

3.4 PROGRAMACIÓN DEL MANTENIMIENTO

3.4.1 Definición y Etapas

La programación es la determinación anticipada del lugar y del momento en que deben iniciarse y terminarse las operaciones necesarias para la fabricación de un producto o la prestación de un servicio.

El alcance y la eficiencia de una programación de mantenimiento quedan limitados por el acierto en la distribución de las órdenes de trabajo y los procedimientos de control; y de manera muy especial por el grado y exactitud de la planeación hecha. En cuanto a los programas de mantenimiento, al igual que los de producción, es de máxima importancia percatarse de que los procedimientos deben ser el resultado de considerar los fines específicos y no de la simple necesidad de contar con ellos.

Los principios básicos de la programación de producción que sirven también para el mantenimiento, son los siguientes [39]:

- Los programas deben basarse en lo que es más probable que ocurra, más que en lo que quisiéramos que ocurriese.
- Hay que tener presente que puede presentarse la necesidad de hacer cambios periódicos en los programas.
- El programa es un medio para conseguir un fin, y no un fin en sí mismo. Su verdadero objetivo es servir al cliente a un costo razonable.
- Los plazos de entrega prometidos deben incluir un margen de tiempo para conseguir materiales, efectuar tramites y hacer las preparaciones necesarias.
- Los registros de carga de trabajo o acumulación de ordenes pendientes correspondientes a máquinas, o grupos de personal, tiene que contener el mínimo de detalles necesarios para suministrar un plan de acción.
- Materiales, herramientas, personal y accesorios tienen que hallarse oportunamente en cada uno de los puntos de control.
- Todo programa tiene que fundarse en un estudio del costo más bajo y de la fecha límite de entrega.

A fin de observar en forma apropiada estas reglas, se necesita seguir determinados procedimientos y normas, precisar los límites de fuerza de trabajo, definir autoridad y responsabilidad, y establecer eficientemente las actividades de control. Con base en lo anterior podemos resumir en tres las etapas de la programación:

- Determinar o estimar el tiempo calendario, que lleva cada actividad o sub-actividad del plan.
- Fijar la secuencia de las actividades según las prioridades predeterminadas.
- Elaborar la programación asignando personas, materiales, máquinas, equipos y demás recursos necesarios.

3.4.2 Clasificación de los Programas

Los programas se pueden clasificar en dos grupos fundamentales de acuerdo a la forma como son elaborados:

- **Programas de asignación de trabajos.** Son aquellos que determinan primero los trabajos y actividades a realizar y basándose en ellos el personal requerido.
- **Programas de asignación de personal.** Aquellos que distribuyen el personal en las diferentes labores a realizar, de acuerdo con una asignación fija de trabajadores a cada área o sección de la industria.

Una segunda clasificación debe ser de acuerdo con la periodicidad con que se van a realizar y los más comunes son:

- Diario
- Semanal
- Mensual
- Semestral y
- Anual.

Cada uno de los tipos de programas enumerados puede según su forma de ejecución ser:

- **Centralizado.** Existe una sola unidad de programación general.
- **Por departamentos.** Cada uno de los departamentos de la empresa intervienen en la elaboración de su programa de mantenimiento particular.
- **Por áreas de proceso.** Cuando existe diversidad de secciones productivas se requiere la elaboración de programas individuales, acordes con sus actividades particulares.

3.4.3 Información Necesaria para Elaborar un Programa

En la elaboración de cualquier programa de mantenimiento, básicamente se necesita la información siguiente:

- Cantidades a intervenir dentro del plan.
- Fechas calendario en que se requiere entregar las máquinas o terminar los servicios, prestados a otros departamentos, talleres o al mismo mantenimiento.
- Tiempos de duración de las operaciones, proceso de adquisición de partes, actividades técnicas o teóricas, etc.

- Capacidad de las operaciones, medida como la fuerza de trabajo disponible del departamento.
- Cantidad de tiempo o días ociosos, no laborables para mantenimiento, para producción o para los proveedores.

3.4.4 Elementos para Hacer una Programación de Trabajo

Todo programa de trabajo requiere fundamentalmente de las etapas de planeación y programación propiamente dichas.

La planeación incluye recopilación de una serie de ideas para incluir en el programa, y la selección de las alternativas. En la programación se definen las actividades y su secuencia con límites de tiempo y la asignación de personal.

Los elementos básicos necesarios para llegar a una buena programación de los trabajos, con base en las etapas mencionadas son los siguientes:

- Planificar el trabajo para trazar el camino del mantenimiento.
- Utilizar un sistema de órdenes de trabajo para organizar, autorizar el trabajo, preparar y controlar lo realizado.
- Usar un procedimiento de estimación de tareas con base a estándares.
- Elaborar un programa general que relacione mano de obra disponible y carga de trabajo.
- Preparar un procedimiento general de programación en detalle.
- Determinar un procedimiento de control de horas, para poder estimar costos.
- Tener una base para medición del trabajo.
- Disponer de un buen sistema de retroinformación.
- Poseer suficientes normas de trabajo.

3.5 TÉCNICAS DE PROGRAMACIÓN

3.5.1 Generalidades

La naturaleza misma de un trabajo exige que se realicen a la vez, la planeación de lo que se debe hacer y el programa de ejecución. Un programa se concibe como una relación de actividades que se instalan secuencialmente en el tiempo y en el espacio con el fin de obtener resultados eficientes y económicos. Para ello se debe determinar las actividades requeridas, los tiempos y las dependencias recíprocas, los requerimientos para la fuerza de trabajo y otros recursos, y la relación de todo lo anterior con el tiempo disponible para la realización del trabajo.

La planificación de los trabajos se puede hacer con mayor eficacia si nos valemos de las técnicas administrativas conocidas como métodos de planeación o programación con redes, que permiten la interconexión de actividades y son aplicables a trabajos o proyectos de gran complejidad e interdependencia.

Los métodos de programación más conocidos son la gráfica de Gantt y los diagramas de flechas CPM y PERT. La gráfica de Gantt es un modo sencillo de mostrar el trabajo realizado y el previsto en el eje horizontal de una gráfica. El método CPM (Critical Path Method) o método de la ruta crítica y el PERT (Project Evaluation and Review Technique) o técnica de evaluación y revisión del programa (proyecto), se basan substancialmente en los mismos conceptos aunque se desarrollaron en forma independiente pero más o menos simultáneamente. Estas dos técnicas originales han permitido el desarrollo de diversos métodos comerciales que aplican esencialmente la misma metodología básica. Algunos de tales métodos son los siguientes: CPS (Programación de Ruta Crítica), LES (Estimación y Programación de Costos Mínimos), PEP (Programa de Evaluación del Proyecto), LUP (Método Rocoso o de Líneas y Puntos de Unión), MICRO-PERT, PERT / COSTO, etc. Esta gran variedad de nombres para las técnicas de programación de redes indican el grado de interés que las mismas han despertado. La diferencia fundamental entre el CPM y el PERT radica en el tipo de trabajos a que se vayan a aplicar. El CPM es utilizable en proyectos determinísticos, en los que el tiempo de duración y el costo de los recursos son conocidos, pues concuerda con actividades habituales constantes, cuya programación y ejecución han sido experimentadas. El PERT se utiliza en proyectos probabilísticos, en los cuales ni los tiempos ni los costos de los recursos se conocen, bien sea por que las actividades son aleatorias, o por que los trabajos no tienen antecedentes que permitan saber con exactitud los tiempos y los recursos. En realidad ambas técnicas pueden utilizar el modelo probabilístico, o el determinístico.

Una segunda diferencia entre las dos técnicas se encuentra en los detalles de preparación del diagrama de flechas como se verá más adelante. Ambos métodos de programación buscan establecer y calcular la ruta crítica, formada por el conjunto de actividades que desde su inicio hasta su terminación deben ejecutarse en el tiempo previsto y en la secuencia determinada; pues de lo contrario se presentarán retrasos en la realización de los trabajos con sus consecuencias de mayor costo [10].

3.5.2 La Gráfica de Gantt

Se trata de una gráfica ideada por Henry L. Gantt en la época de la primera guerra mundial y se utiliza en la planeación y en la programación. Cada actividad se inscribe en la parte izquierda de la gráfica. Los tiempos programados o proyectados se trazan a la derecha en una escala calendárica horizontal y en forma de barras sin sombrear, cuya longitud indica el tiempo calculado de duración para el trabajo. El tiempo real se expresa mediante una barra sombreada superpuesta. En esta forma podrá observarse en cualquier momento cuáles trabajos se están cumpliendo de acuerdo a lo previsto, cuáles están retrasados y cuáles adelante de lo estipulado.

La planeación de la gráfica se hace convirtiendo los trabajos programados en "unidades de tiempo planeado" que medirán la duración de las actividades objeto del plan.

El control del avance de las actividades se hace convirtiendo los resultados en "unidades de tiempo real" y mediante la comparación de las escalas de tiempo planeadas y reales, se determina permanentemente las desviaciones.

Algunas de las ventajas reales que presenta el método de Gantt son:

- Obliga a elaborar un plan, lo cuál es un adelanto para realizar operaciones más eficaces.
- Es fácil de comparar en la gráfica la labor planeada y realizada; y no es necesario recordar un cúmulo de datos para su análisis permanente.
- Las gráficas de Gantt son compactas; una sola gráfica puede reemplazar gavetas enteras de información.
- Son fáciles de elaborar, pues solo se requiere papel, regla y lápiz.
- Estas gráficas son dinámicas y muestran un cuadro animado de las actividades de la planta.

La gráfica de Gantt tiene una limitación principal, consistente en que no muestra los problemas o demoras, que se presentan en las actividades hasta que no han tenido lugar; es decir la gráfica de Gantt no es predictiva.

3.5.3 Método de la Ruta Crítica

El método del camino crítico o CPM es una poderosa herramienta de planeación y control que ha sido utilizada con resultados recompensables; junto con el PERT son los procedimientos más conocidos que recurren a una red o diagrama de flechas que representa las interrelaciones de los distintos trabajos de un proyecto.

En general los componentes de un diagrama de flechas son los siguientes [39]:

- Acontecimientos o nodos, que constituyen puntos claramente definidos en el señalamiento de el tiempo en que comienza o termina una actividad.
- Trabajos o actividades, que son los que se desarrollan entre nodo y nodo y corresponden a tareas claramente definidas en las que se aplica una determinada cantidad de mano de obra y otros recursos.
- Tiempos de duración, de cada una de las actividades previamente determinados.

- Red, diagrama que muestra las interdependencias de las actividades y que define las secuencias correspondientes.
- Camino crítico, secuencia de actividades de mayor duración que determina el tiempo necesario para alcanzar el acontecimiento final.
- Holgura, tiempo disponible en las demás secuencias diferentes de la ruta crítica.

El empleo de flechas que simbolizan las actividades, y de círculos que representan los acontecimientos, hace que se pueda establecer una relación definida para el avance o progresión del programa. La determinación del mayor tiempo transcurrido a lo largo del diagrama es la ruta crítica de principio a fin. El análisis indicará que elementos del diagrama es probable que cause demoras con lo que será posible emprender acciones inmediatas para evitarlas, lo cual equivale a planear con suficiente anticipación los puntos críticos.

La técnica de la ruta crítica presenta muchas ventajas entre las que se pueden enumerar:

- Implica la determinación de eventos específicos y bien definidos.
- Requiere la delimitación particularizada de todas las actividades, con su tiempo de duración.
- Se muestran las interrelaciones entre actividades y secuencias.
- Los aspectos críticos de cada actividad se señalan mucho antes de que ocurran.
- Permite decidir económicamente que actividades deben o no acelerarse.
- Suministra información dinámica y actualizada.
- Simplifica el problema de las comunicaciones a través de un plan detallado de acción.
- Fuerza la marcha del trabajo y revela insuficiencias en los métodos, supervisión y equilibrio de mano de obra.

Un adecuado procedimiento para aplicar el CPM a un programa de trabajo debe seguir la siguiente secuencia:

- Hacer una lista de todas y cada una de las actividades.
- Estimar el tiempo de duración normal y costo de cada actividad en base a la fuerza de trabajo necesaria.
- Elaborar el diagrama de flechas con base en la obtención previa de la matriz de secuencias requeridas para construir la red.
- Analizar y resolver la red.
- Determinar la ruta crítica y las holguras para las demás rutas no críticas.
- Interpretar técnica y económicamente los resultados.

- Reestructurar la red para ajustar la ruta crítica si fuere necesario.

El ejemplo de aplicación del CPM al mantenimiento de un compresor recíprocante de un solo pistón con motor integral, aclara la forma de elaborar la matriz de secuencias y construir la red correspondiente.

La lista de actividades con su tiempo de duración y el personal requerido para ejecutarlas es la siguiente:

ACTIVIDAD	TRABAJO	TIEMPO(Min)	PERSONAL
A	Paro del compresor y desenergizar	10	1 E
B	Desconectar motor	15	1 e
C	Vaciar aceite del carter	15	1 M
D	Sacar válvulas de succión y descarga	40	1 M
E	Abrir cilindro	20	1 M
F	Sacar pistón	55	1 m
G	Sustituir sello de flecha	10	1 m
H	Reemplazar anillos y motor pistón	60	1 m
I	Tapar cilindro	20	1 m
J	Montar válvulas	45	1 m
K	Poner aceite a carter y lubricadores	10	1 m
L	Quitar motor	20	1 E
M	Limpiar motor	30	1 E
N	Montar motor	40	1 E
O	Conectar y energizar	20	1 E
P	Prueba de vacío	15	2 M/E
Q	Prueba de carga	30	2 M/E

Para la designación del personal, las letras mayúsculas corresponden a electricistas y mecánicos de primera respectivamente, y las letras minúsculas a asistentes de electricidad y mecánica.

La Figura 14 nos muestra la correspondiente matriz de secuencias, donde la actividad A (inicial) no tiene requisito, y la actividad Q (final) no es requisito de ninguna otra.

El diagrama de flechas o red, construido a partir de la matriz de secuencias que incluye todas las actividades del programa, se muestra en la Figura 15.

Las posibles rutas dentro de la red con sus tiempos de duración totales son las siguientes:

- Ruta A, B, L, M, N, O, P, Q, 180 min (3 horas).

- Ruta A, C, K, P, Q 80 min (1h. 15 min).
- Ruta A, D, E, F, G, H, I, J, K, P, Q 315 min (5H. 15min).

Observamos que la tercera ruta es la ruta crítica y que las holguras de las otras dos rutas son relativamente grandes, lo cual se presta para hacer un análisis técnico-económico del camino crítico, y ver si aumentando el personal o los recursos de las actividades críticas, se logra un ahorro considerable por disminución del tiempo total mínimo de reparación del equipo, dado por el tiempo de duración de la ruta crítica.

3.5.4 Sistema PERT

El método PERT (técnica de evaluación y revisión del programa) que tiene como objetivo, planear y evaluar sobre una base ordenada y coherente, proporciona un instrumento automático para la identificación de puntos potenciales de trastorno en un proyecto y permite también cierto grado de simulación de las condiciones sin necesitar cambios reales en los programas [10].

El diagrama PERT es semejante al CPM, salvo en que contiene más información. El desarrollo del PERT es paralelo al del CPM hasta que se inicia el razonamiento probabilístico. El PERT utiliza un enfoque de tres tiempos con estimaciones del optimista, el más probable y el pesimista, por cada actividad separada.

- **El tiempo optimista** (T_o) es el que se necesitaría si se procediera en condiciones ideales. Estima que la probabilidad de que la actividad se pueda realizar en menos tiempo es de solo uno por ciento.
- **El tiempo pesimista** (T_p) es lo contrario del optimista, salvo situaciones totalmente incontrolables, señala el tiempo que se necesitaría si todos los que tuvieran que realizar la actividad lo hicieran mal. Estima la probabilidad de que la actividad se puede demorar más tiempo, es también del uno por ciento.
- **El tiempo más probable** (T_m) es aquel que en términos de la experiencia, tomará esta actividad con más probabilidad, en las circunstancias que se espera ha de existir.

Con base en los tres tiempos estimados se determina el tiempo esperado (T_e), es decir, el tiempo que divide el espacio total de la probabilidad por la mitad, mediante la ecuación:

$$T_e = (T_o + 4T_m + T_p) / 6$$

Con este valor, se realizan los cálculos para resolver la red, y determinar la ruta crítica como se hace en el CPM.

El sistema PERT permite también determinar la probabilidad de éxito o probabilidad de cumplir con el programa, mediante el cálculo de las holguras y la incertidumbre del tiempo esperado para cada actividad. La desviación estándar es una medida de la incertidumbre de una estimación. La varianza para cada actividad se calcula mediante la ecuación:

$$\sigma. Te^2 = (Tp - To)^2 / 36$$

Cuando la desviación típica o varianza es pequeña indica que las estimaciones son bastante precisas, mientras que si es alta indica una gran incertidumbre.

La utilización del mecanismo básico del PERT facilita un gran número de aplicaciones. La experiencia ha demostrado que el PERT es una técnica efectiva para la planificación del trabajo, valoración del progreso y determinación de los problemas potenciales antes de que se produzcan. Las principales ventajas del sistema PERT son las siguientes:

- Ayuda a planificar y muestra el programa.
- El PERT como el CPM exigen la selección de eventos específicos y bien definidos.
- Muestra las relaciones de dependencia recíproca entre eventos y actividades.
- Exige el tiempo del cálculo esperado de todas las actividades y revela la incertidumbre que puede existir.
- Como el CPM, los aspectos críticos los señala mucho antes de que ocurran.
- Integra todos los elementos del programa e incrementa las comunicaciones.
- Predice la probabilidad de cumplir con el programa.

Con la aplicación del sistema PERT o, CPM al mantenimiento, es factible una economía de tiempo y costo, ya que el plazo total de los programas puede abreviarse por medio del análisis de la red, y una adecuada replaneación; con lo cual se logra reducir al mínimo las suspensiones en la producción. También es posible bajar los costos mediante simplificación de actividades selectivas, recurriendo a tiempo extra de trabajo si fuere necesario, para ciertas fases de la programación.

3.6 CRITERIOS PARA DEFINIR PRIORIDADES

Los criterios básicos que se usan para definir la prioridad con que se deben realizar los trabajos dentro de un programa de mantenimiento, son de tres tipos:

- De Producción
- De Mantenimiento
- De Autoridad.

3.6.1 Criterios Productivos

Son los que miden la importancia del equipo con relación a la función principal para la cuál fueron diseñados; esta importancia productiva depende de cuatro factores básicos:

- Su capacidad. En cuanto a su volumen de producción y su volumen de utilización.
- Su influencia en el proceso productivo. Determinada por su efecto en la calidad del producto y su efecto sobre otros equipos vinculados.
- Su rentabilidad. Determina su eficiencia productiva en términos económicos.
- Su riesgo. Parámetro que mide los posibles riesgos por falla de un equipo, que ocasionan peligros a la salud humana o a la seguridad de los demás equipos e instalaciones.

3.6.2 Criterios de Mantenimiento

Son los que miden la importancia del equipo de acuerdo a sus necesidades particulares de mantenimiento, entre ellos podemos enumerar:

- Costo de hacer o no hacer el trabajo. Valora económicamente la posibilidad de diferir el trabajo durante un lapso determinado, o la necesidad de realizarlo en el menor tiempo posible.
- Disponibilidad de mano de obra. Determina la posibilidad de uso de mano de obra excesiva o en tiempo extra, y relaciona su costo con el de el tiempo perdido.
- Velocidad y gravedad de deterioro. Mide la importancia de la falla con la velocidad de deterioro, y los posibles problemas que puede ocasionar la operación deficiente del equipo.
- Riesgo de postergación del mantenimiento. Analiza las posibilidades de riesgo ocasionadas por el aplazamiento en la intervención del equipo cuando se detectan las fallas, y las consecuencias de su operación en la condición de riesgo calculado.

3.6.3 Criterios de Autoridad

Son aquellos determinados por el grado de autoridad que le corresponde a las personas que tienen el poder decisorio en el departamento, y que se utiliza cuando los criterios productivos y de mantenimiento no determinan claramente la prioridad inmediata.

La autoridad es el poder legal para mandar, actuar o decidir y se concibe como una combinación de autoridad personal, compuesta de inteligencia, experiencia, valor moral y servicios anteriores.

Los criterios de autoridad son en últimas, los que definen las prioridades a adoptar en los trabajos, con base en los criterios productivos o de mantenimiento y en las necesidades particulares del momento, originadas en los compromisos productivos o comerciales preestablecidos.

3.7 SISTEMA - RIME - PARA FIJAR PRIORIDADES

Un método básico para establecer la prioridad con que se dará el servicio de mantenimiento es el de los "índices RIME" (Ranking Index for Maintenance Expenditures) que se puede traducir como índice clasificado para programación de mantenimiento. Mediante el índice correspondiente se determinará la prioridad, siendo esta más importante entre mayor sea el índice [39].

El índice RIME se halla multiplicando la clave del equipo, por la clave de la actividad o clave de la descripción del trabajo.

La clave del equipo o clave de máquina mide la importancia relativa de cada pieza del equipo, mediante el empleo de factores básicos seleccionados, y se cuantifica por el efecto que da como resultado en la producción al dejar de operar.

En la clave de actividad o clave de descripción del trabajo, además de clasificar el equipo, es indispensable determinar la importancia relativa de las labores de mantenimiento, a fin de programar antes que todo los trabajos apropiados según los factores de realización del trabajo.

El factor de trabajo estándar del RIME involucra por tanto, costo de mantenimiento diferido, costo de producción perdida, costo de mano de obra en exceso y una clasificación de seguridad.

La mayoría de los factores involucrados son tangibles y sujetos a una evaluación cuantitativa. El hecho de que existan algunos factores particularmente intangibles, como los riesgos de seguridad, no disminuye la importancia de un desarrollo lógico de los factores que pueden ser medidos con bastante exactitud.

3.7.1 Claves de Máquina

Cada máquina y pieza de equipo de servicio es colocada en una de las 10 categorías de clave de máquinas. Los más importantes equipos llevan un valor de clave de 10 y los menos importantes de clave de 1.

El índice RIME de -clave de máquina- cambia con el uso del equipo, las adiciones de equipo nuevo y el producto elaborado.

- **Clave 10: Equipo crítico.** Equipo mayor de servicios críticos que influyen en más de una línea de producción, incluye tableros y líneas de distribución eléctrica que afectan totalmente la planta en gran escala y de inmediato.
- **Clave 9: Equipo clave de producción.** Equipos para el cual no se tiene repuesto, incluye todos sus accesorios que estén en las mismas condiciones, afecta producción total. Ejemplo: compresor de nitrógeno, columna de destilación.
- **Clave 8: Equipo múltiple de producción directa.** Equipo o unidades para los cuales se tiene disponible equipo de repuesto, incluyendo los auxiliares que estén en las mismas condiciones. Afecta producción parcial. Ejemplo: caldera 1(Cuando existen varias).
- **Clave 7: Sistema de manejo directo.** Esta categoría incluye todas las líneas necesarias de servicio a la producción, como tuberías, transportadores, montacargas, afecta parcial de inmediato.
- **Clave 6: Equipo móvil auxiliar de la producción.** Incluye todas las facilidades de servicio necesarias como montacargas, transportadores, etc., que estén directamente ligados a los procesos. Ejemplo: elevador, grúa, malacates, etc. Afecta parcial o gradualmente con el tiempo, puede cubrirse con exceso de mano de obra.
- **Clave 5: Equipo de producción sin repuesto.** Incluye todas las instalaciones necesarias de servicio, afecta calidad temporalmente. Ejemplo: tanque combustible o tanques de almacenamiento.
- **Clave 4: Equipo de servicio a producción.** Incluye todas las instalaciones necesarias de servicio, que afectan la calidad. Ejemplo: compresores, bombas o equipos dúplex.
- **Clave 3: Sub-productos.** Incluye todas las instalaciones necesarias de servicio a otros equipos. Ejemplo: soportes de equipo, tuberías, bases, etc.
- **Clave 2: Construcciones y caminos.** Aquellos necesarios a la producción. Ejemplo: drenajes, andenes, almacenes, etc.
- **Clave 1: Edificios caminos y oficinas.** Aquellos que no influyen directamente en la producción. Ejemplo: servicios sanitarios, jardines, calles, etc.

3.7.2 Claves de Actividad

Todo el trabajo de conservación, construcción y reparación hecho por el departamento de mantenimiento, es clasificado en 10 clases. El trabajo de más importancia se clasifica con el número 10 y el de menos importancia es de la clave 1.

- **Clave 10: Emergencia por Mantenimiento Correctivo** o por condición insegura. Trabajos de mantenimiento en equipo fuera de servicio con falla imprevista causando pérdidas de producción o de calidad en el producto. Trabajos para normalizar un equipo productivo dentro de un estándar de operación. Trabajos de seguridad donde la condición insegura causa un peligro potencial de accidente o siniestro.
- **Clave 9: Servicio a Producción.** Trabajos de mantenimiento que son necesarios para cubrir un programa de producción. Adaptaciones y modificaciones de equipos para elaborar un determinado producto.
- **Clave 8: Mantenimiento Preventivo Directo.** Trabajos de mantenimiento preventivo derivados de inspecciones y que tienden a eliminar posibles fallas o correctivos inminentes de corto plazo. Trabajos en sistemas de alarmas automáticos; lubricación.
- **Clave 7: Inspecciones de Mantenimiento Preventivo.** Trabajos de mantenimiento preventivo puro. Inspecciones o análisis de máquinas para detectar desviaciones al estándar de operaciones que puede provocar un mantenimiento correctivo a largo plazo o producir mala calidad del producto. Trabajos de recuperación de partes de repuesto.
- **Clave 6: Mantenimiento Preventivo de desarrollo.** Trabajos de mantenimiento preventivo que son originados para mejorar el comportamiento de una máquina, que para realizarse es necesario que el equipo pare; pero no es crítico y puede programarse a mediano plazo.
- **Clave 5: Automantenimiento.** Trabajos de mantenimiento en herramientas o equipos para mantenimiento.
- **Clave 4: Mejoras en Producción o Calidad.** Modificaciones aprobadas por mantenimiento que son convenientes de realizar para lograr mejoras en el volumen de producción o calidad del producto. Generalmente representan una inversión capitalizable.
- **Clave 3: Reducción de Costos.** Trabajos o modificaciones complementarias de mantenimiento, convenientes de realizar para lograr reducción de costos de operación. Generalmente representa una inversión capitalizable.
- **Clave 2: Mantenimiento y servicios auxiliares.** Trabajos de mantenimiento en instalaciones conectadas directamente con producción. Trabajos de estética, mejoramiento o conservación física.
- **Clave 1: Limpieza.** Todo trabajo relacionado con el aseo y limpieza de instalaciones; cuando se relaciona con producción puede considerarse en otra clasificación.

3.8 PREPARACIÓN DE LOS TRABAJOS DE MANTENIMIENTO

3.8.1 Objetivos

Se puede decir que todos los trabajos de mantenimiento deben ser preparados de una u otra manera. Aún cuando existan casos de emergencia se debe proceder sistemáticamente.

En la labor de mantenimiento, hacer observaciones metódicas de un trabajo permite a menudo obtener ahorros potenciales. Ello se logra mediante:

- El mejoramiento de las condiciones de trabajo.
- La adecuación racional de los puestos de trabajo.
- El adiestramiento de los operarios en procesos simplificados de trabajo.

El personal de mantenimiento dedicado a hacer preparaciones, debe poder reconstruir mentalmente lo que tiene que ser una ejecución correcta, descubrir los puntos claves y todas las dificultades que los ejecutantes puedan encontrar.

Efectuar una ordenada preparación de los trabajos tiene como objetivos [25]:

- Reducir el tiempo improductivo de los equipos, por causa de la duración de su mantenimiento.
- Reducir el tiempo de mano de obra directa, utilizada en la realización de los trabajos.
- Adaptar la calidad de trabajo a las necesidades, es decir cada actividad o trabajo tiene sus requisitos de calidad y estos son los que se deben cumplir.
- Simplificar el trabajo, consiste fundamentalmente en eliminar lo inútil y mejorar lo necesario, para que las acciones especificadas sean cada vez más sencillas.
- Lograr una estimación acertada del tiempo de duración del trabajo.

Con una adecuada preparación se logra básicamente, aumentar el porcentaje de tiempo productivo de los trabajadores y por tanto disminuir el tiempo perdido en actividades improductivas, que normalmente representan más de un 50% del tiempo total de labores. Las principales labores improductivas son:

- Búsqueda de herramientas
- Confección o adaptación de la herramienta
- Desplazamiento a almacenes, talleres, etc.
- Esperas por instrumentos o refacciones
- Espera para recibir instrucciones.

3.8.2 Razones y Justificaciones

Existen razones y justificaciones suficientes para decir que siempre es mejor una buena preparación de los trabajos, que enfocar toda la fuerza disponible en la ejecución o realización propiamente dicha. Algunas de estas razones son:

- Se mejora el estado de ánimo de todas las personas encargadas de la ejecución, supervisión y control de los trabajos.
- Un buen sistema de preparación reduce las emergencias y por tanto los problemas.
- Se hace necesario definir el tiempo de duración límite para clasificar los trabajos, que necesitan o no, preparación formal.
- Por ser los trabajos repetitivos en mantenimiento mayores a un 30% del total, se justifica una preparación formal, que será utilizada frecuentemente.
- Una preparación efectiva, hace que el personal ejecutante lleve a cabo los trabajos con gusto, calidad y prontitud.
- El personal preparador adquiere dotes de polivalencia, es decir se especializa y versatiliza en equipos, actividades, programas y procedimientos.

3.8.3 Eficiencia, Planeamiento y Fases

La eficiencia en la ejecución de trabajos de mantenimiento depende, en mayor o menor grado, de los siguientes factores, los cuales normalmente son elementos propios del sistema:

- Historia de maquinaria completa y actualizada.
- Documentación técnica completa, actualizada y bien accesible.
- Uso de equipos, instrumentos, métodos y técnicas modernas.
- Equipos, herramientas e instrumentos en cantidades suficientes y de buena calidad.
- Infraestructura eficiente.
- Formación cuidadosa y continua del personal de mantenimiento y de operación.
- Motivación del personal.
- Ambiente de trabajo seguro y limpio.
- Organización estructural.
- Organización gerencial.
- Organización procedimental.
- Sistema de órdenes de trabajo.

El planeamiento significa preparación mental de acciones futuras. El individuo es activo en el presente y prepara acciones para el futuro, es decir determina QUIEN debe hacer QUE, DONDE, COMO, con QUE y CUANDO.

Existen diferentes tipos de planeación:

- Planeamiento de trabajo
- Planeamiento de secuencias
- Planeamiento de tiempo
- Planeamiento de fechas límite
- Planeamiento de carga de trabajo
- Planeamiento de capacidades de personal
- Planeamiento de material
- Planeamiento de costo.

Las fases normales de preparación de los trabajos son cuatro. Dependiendo de la organización estructural y del tipo de trabajo, se ejecutan las fases, de inmediato, una tras otra, en forma escalonada o con interrupciones. Estas son:

- Planificación
- Organización
- Dirección
- Evaluación

La fase de planificación incluye todo el trabajo realizado antes de efectuar una tarea de mantenimiento en sí misma, a fin de determinar:

- Secuencia
- Método, procedimiento
- Precauciones de seguridad
- Tiempo planeado
- Recursos.

La fase organización incluye todo el trabajo realizado inmediatamente antes de efectuar una tarea propiamente dicha, tomando en consideración:

- Cuando deberá realizarse el trabajo
- Disposición de los medios requeridos
- Coordinación
- Información
- Elaboración y complementación de los documentos requeridos.

La fase dirección incluye todo el trabajo durante la ejecución de dicha tarea, por ejemplo:

- Instrucción del trabajo
- Actualización de los diferentes planos
- Control de costos y horas-hombre
- Control de calidad
- Coordinación a corto plazo.

La fase evaluación incluye todo el trabajo después de la ejecución de dicha tarea, por ejemplo:

- Análisis de la planificación.
- Archivo de los documentos.
- Actualización de la historia de maquinaria.
- Actualización de la documentación técnica.

Los trabajos de mantenimiento donde se aplica normalmente preparación más amplia del trabajo son:

- Aplicación de métodos, procedimientos y tecnologías nuevas.
- Trabajos de gran tamaño.
- Trabajos de gran importancia.
- Trabajos de gran riesgo.
- Trabajos complejos.
- Trabajos repetitivos.

Una preparación de trabajo, independiente del grado de detalle, debe siempre cubrir los siguiente puntos:

- Donde debe hacerse, qué y por qué
- Como proceder
- Cuanto tiempo se necesita
- Qué medios se necesitan
- Cuándo se ejecuta
- Precauciones de seguridad
- Información
- Coordinación.

3.8.4 Etapas y Procedimientos de Preparación

Son varias las etapas necesarias para una inspección y preparación de los trabajos:

- Análisis racional de la situación del equipo.
- Diagnóstico de las necesidades.
- Preparación de materiales y equipos.
- Descripción detallada del trabajo.

- Coordinación e integración de las actividades.
- Vigilancia y control.

Hacer una preparación consiste en efectuar de modo lógico y operativo las fases y etapas requeridas, y relacionarlas para cada equipo por medio de un esquema de enganche o una gama tipo. Cada gama tipo debe contener el conjunto de operaciones necesarias para constituir un trabajo completo, cuyo principio y término estén claramente definidos; y puede ser completamente realizado sin interrupción y sin modificaciones en la cantidad de ejecutantes.

La Figura 16 muestra una forma auxiliar para análisis del trabajo, que se utiliza en la preparación específica de cada actividad, donde se incluyen los pasos secuenciales, los factores asociados y los controles recomendados. La Figura 17 es un diagrama sencillo para la elaboración de los procedimientos de trabajo, que se usa cuando la preparación del trabajo requiere la determinación del procedimiento a seguir.

Dividiendo el trabajo en fases se logra:

- Utilizar la mano de obra con la misma eficiencia.
- Controlar el progreso del trabajo, mediante el encadenamiento de las fases.
- Instruir a los ejecutantes en forma precisa y exacta según las necesidades.

La organización requerida para poder llevar a cabo una buena preparación debe formarse con dos grupos independientes:

- El grupo de preparación, dedicado además a planeación, control, registro y estadísticas.
- El grupo de ejecución, que realiza los trabajos con los programas, procedimientos y normas, establecidos por el grupo anterior.

Es además de fundamental importancia que entre los dos grupos exista la cooperación y armonía necesaria, para trabajar conjuntamente en el logro de los objetivos planeados, y que dependan de un mismo jefe coordinador.

3.8.5 Localización de Fallas

Teniendo en cuenta que la determinación de un daño, es la causa que origina en muchos casos mayor pérdida de tiempo en la reparación, esta debe hacerse sistemática y lógicamente. Una actitud sin meditación y sin un concepto claro raramente conduce al éxito. Cada prisa en la localización de errores es inoportuna y aumenta además el riesgo de seguridad. Por desaciertos y decisiones erróneas se gasta más tiempo que con trabajo continuo y concentrado. Cuanto más rápida y exactamente se investiga el daño y su causa, tanto más eficaz y mejor puede ser su reparación [25].

La condición previa esencial para una localización rápida y segura de un daño, es comunicar claramente el problema al departamento de mantenimiento según un procedimiento predeterminado. Los medios comunes para la localización de fallas son:

- Sentido común
- Intercambio de experiencias
- Método de resolución sistemática de problemas
- Métodos "OOVS" (oír, oler, ver, sentir)
- Guías "Trouble-Shooting" (listas de chequeo)
- Diagramas de búsqueda de daños /fallas
- Sistemas expertos.

El uso de los medios correspondientes se orienta parcialmente con el grado de complejidad de la instalación o máquina, como con el grado momentáneo de dificultad del problema.

Un medio tan sencillo como eficiente es el intercambio interno de experiencias dentro de la empresa. Otras posibilidades, son el intercambio de experiencias con los diferentes proveedores, así como entre las fábricas con el centro técnico del distribuidor o, de los fabricantes.

El conocimiento de los elementos del método de resolución sistemática de problemas ofrece, tanto en la propia localización, determinación y reparación del daño como también en la elaboración de guías "trouble-shooting" y diagramas de "trouble-shooting", grandes ventajas.

Con equipos y máquinas sencillas así como con problemas sencillos, el responsable de mantenimiento va a servirse del método "OOVS". La oreja susceptible, la nariz crítica, el ojo entrenado y la mano práctica junto con buenos conocimientos de instalaciones, máquinas y sistemas, entran aquí en acción para determinar rápida y exactamente la situación.

Como regla, dichas guías "trouble-shooting" contienen los tres modos de información siguientes:

- Síntomas de falla
- Causas posibles del daño
- Medidas para la reparación.

Igualmente para equipos, máquinas y sistemas complejos, como controles electrónicos e hidráulicos, se usan diagramas de búsqueda. El "trouble-shooter" para estos casos está dirigido sistemáticamente paso a paso hasta la localización exacta del daño.

La Figura 18 es un diagrama comúnmente utilizado para análisis de fallos, mediante el cual es fácil detectar por medio de inspecciones visuales el tipo de fallas, la clase de defectos, y demás aspectos necesarios para un correcto diagnóstico de maquinaria [6].

Otro medio para facilitar de manera eficaz la localización de daños, serán a mediano plazo los sistemas expertos. Con ellos, la persona encargada de la localización, que no tiene necesariamente

que ser un experto, cuenta con la ayuda sistemática por computador. El capítulo 7 aborda brevemente los temas Inteligencia Artificial y Sistemas Expertos.

3.9 PROGRAMACION DE INSPECCIONES GENERALES DE PLANTAS

La inspección general de planta, es uno de los trabajos de mayor importancia que realiza el departamento de mantenimiento porque prácticamente involucra todo el personal ya sea directa o indirectamente.

La planificación de las inspecciones generales, requiere técnicas como el CPM, diagrama de GANTT, diagrama de barras, balance de personal y programación de los trabajos, elaborada con meticulosidad por personal con amplia experiencia en mantenimiento. Normalmente la inspección se debe ceñir a un programa anual de inspección de planta, elaborado con mucha anticipación y que se incluya en el programa anual de producción, y en el presupuesto de gastos de operación.

La programación de una inspección de planta, requiere la realización de los pasos secuenciales siguientes, para los cuales debe disponerse de un tiempo prudencial de acuerdo con la magnitud de la misma [24].

3.9.1 Programa Tentativo

Basado en el programa anual de inspección, planeación elaborará un listado preliminar de los trabajos a ejecutar y enviar copias a cada área involucrada con el fin de que se incluya aquellos a realizar en el campo de su responsabilidad, y se conozcan los que requieren parada de planta.

3.9.2 Creación de Cargos Contables

Para cada inspección de planta, cuyos costos están incluidos en el presupuesto de gastos de operación, se debe asignar un centro contable específico al que deberá cargarse todos los generados por la ejecución.

3.9.3 Programa Definitivo

Teniendo en cuenta los trabajos adicionales propuestos, se cita a una reunión en la que participan operaciones, técnica, Ingeniería, inspección, planeación, talleres y el área de mantenimiento correspondiente. En la misma se analizan todos los trabajos pedidos o sugeridos, su alcance, se

estudian alternativas de ejecución, se concreta el programa definitivo, los recursos mayores y el tiempo estimado de duración de la inspección de la planta.

3.9.4 Planificación

Contando con los elementos reunidos en los pasos anteriores se procede a efectuar la planificación correspondiente. Mediante una reunión de planeación se ejecutan las siguientes actividades:

- Analizar cada tarea.
- Fijar técnicas de ejecución.
- Determinar equipos, materiales, herramientas y mano de obra necesarias.
- Definir trabajos de pre y post-parada.
- Confeccionar el organigrama de parada y fijar responsabilidades.

Definidos estos aspectos se procede a definir el orden de prioridades, se ejecuta el programa de flechas por el sistema CPM, del cual resulta el tiempo total necesario para la inspección. Del acuerdo posterior entre operaciones, técnica y mantenimiento se fija el tiempo definitivo de la parada.

3.9.5 Información

Realizada la planificación se convoca a una reunión informativa con todos los sectores de apoyo involucrados, donde se les notifica:

- Fecha de iniciación y terminación de la inspección.
- Cargos contables y costos generales de la inspección.
- Cálculo preliminar de necesidades prioritarias para la inspección.
- Horario de trabajo y requerimientos especiales de mantenimiento.
- Trabajos más importantes.

3.9.6 Trabajos Pre-Inspección

De acuerdo a lo planificado se ejecutan como trabajos de pre-inspección, todos aquellos trabajos auxiliares realizables con la planta operando, así como la ubicación en la misma de todos los recursos de apoyo necesarios, traslado de materiales, herramientas y equipos a usar.

3.9.7 Programación

Los aspectos a tratar en la etapa de programación son:

- Definir las posibilidades de los elementos humanos y materiales con que cuenta la planta.
- Determinar las necesidades de personal especial a contratar.
- Definir los trabajos a realizar por contratistas.
- Verificar la existencia de materiales y repuestos necesarios.
- Verificar la existencia de herramientas y equipos.
- Hacer la distribución de la fuerza de trabajo disponible en la planta.
- Determinar horarios de reunión diaria para análisis y seguimiento de los trabajos.
- Realizar la verificación final del diagrama CPM y su ruta crítica.
- Confeccionar la carpeta general de la inspección.

3.9.8 Apoyo

Cumplida la programación se cita a una última reunión general antes de la parada de la planta, con los sectores de apoyo involucrados, donde mantenimiento concreta sus necesidades finales, resultantes de la planificación definitiva.

3.9.9 Ejecución

Durante la etapa de ejecución propiamente dicha se debe realizar diariamente, una reunión formal entre operaciones y mantenimiento. En ella se analiza la marcha general de la inspección incluyendo:

- Control de ejecución en tiempo, cantidad y calidad.
- Actualización del programa.
- Toma de decisiones con respecto a situaciones imprevistas.
- Uso de recursos.
- Condiciones de seguridad.

3.9.10 Revisión Final

Cada trabajo requiere el control final de mantenimiento y operaciones para obtener el visto bueno de esta última. Al término de la inspección general se debe realizar una revisión de comprobación y control de lo programado con lo ejecutado, y así determinar los pendientes del programa.

3.9.11 Trabajos de Post-Inspección

Después de finalizada la inspección general se realizarán trabajos adicionales de limpieza, aislamiento, pintura y demás con la finalidad de:

Mantener el orden del área, favoreciendo sus condiciones de seguridad.
Reponer la aislamiento deteriorada como consecuencia de las actividades de inspección.
Reconstruir el estado físico de la planta mediante los trabajos de adecuación y pintura necesarios.

3.9.12 Informe Final

El control y análisis detallado de la inspección generan el informe final en el que se resumen los comentarios provenientes de todos los sectores involucrados con sus recomendaciones.