



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica

**SISTEMA DE GESTIÓN DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO BASADO EN RCM PARA LA
REDUCCIÓN DE FALLAS DE LA MAQUINARIA DE UNA CENTRAL HIDROELÉCTRICA**

Justo Antonio Pérez Medrano (Jr)
Asesorado por el Ing. Julio César Torres García

Guatemala, febrero de 2020

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**SISTEMA DE GESTIÓN DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO BASADO EN RCM PARA LA
REDUCCIÓN DE FALLAS DE LA MAQUINARIA DE UNA CENTRAL HIDROELÉCTRICA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

JUSTO ANTONIO PÉREZ MEDRANO (JR)

ASESORADO POR EL ING. JULIO CÉSAR TORRES GARCÍA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO MECÁNICO

GUATEMALA, FEBRERO DE 2020

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Christian Moisés de la Cruz Leal
VOCAL V	Br. Kevin Armando Cruz Lorente
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Esdras Feliciano Miranda Orozco
EXAMINADOR	Ing. Víctor Manuel Ruiz Hernández
EXAMINADOR	Ing. Gilberto Enrique Morales Baiza
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

SISTEMA DE GESTIÓN DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO BASADO EN RCM PARA LA REDUCCIÓN DE FALLAS DE LA MAQUINARIA DE UNA CENTRAL HIDROELÉCTRICA

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica, con fecha 25 de abril de 2019.

Justo Antonio Pérez Medrano (Jr)

Guatemala, 14 de noviembre 2019

Ingeniero
Roberto Guzmán Ortiz
Director Escuela de Ingeniería Mecánica
Facultad de Ingeniería
USAC

Por medio de la presente, informo que como asesor del estudiante **Justo Antonio Jr Pérez Medrano**, quién se identifica con registro académico **2010 20931** y **CUI 2161863311401**, procedí a revisar el trabajo de graduación titulado: **“SISTEMA DE GESTIÓN DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO BASADO EN RCM PARA LA REDUCCIÓN DE FALLAS DE LA MAQUINARIA DE UNA CENTRAL HIDROELÉCTRICA”**, el cual encuentro satisfactorio.

En tal virtud, **LO DOY POR APROBADO**, solicitándole darle el trámite respectivo.

Sin otro particular, me es grato suscribirme.

Julio César Torres García
ING. MECÁNICO
Colegiado 11286


Ing. Julio César Torres García

Colegiado No. 11286

ASESOR



USAC

TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería Mecánica

Ref.E.I.M.286.2019

El Coordinador del Área Complementaria de la Escuela de Ingeniería Mecánica, luego de conocer el dictamen del Asesor y habiendo revisado en su totalidad el trabajo de graduación titulado: **SISTEMA DE GESTIÓN DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO BASADO EN RCM PARA LA REDUCCIÓN DE FALLAS DE LA MAQUINARIA DE UNA CENTRAL HIDROELÉCTRICA** presentado por el estudiante **Justo Antonio Jr Pérez Medrano**, CUI **2161863311401** y Reg. Académico No. **201020931** recomienda su aprobación.

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"

Ing. Carlos Humberto Pérez Rodríguez
Coordinador Área Complementaria
Escuela de Ingeniería Mecánica



Guatemala, noviembre 2019



USAC

TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería Mecánica

Ref.E.I.M.063.2020

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica, de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Asesor y del Coordinador del Área Térmica, al trabajo de graduación titulado: **SISTEMA DE GESTIÓN DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO BASADO EN RCM PARA LA REDUCCIÓN DE FALLAS DE LA MAQUINARIA DE UNA CENTRAL HIDROELÉCTRICA** presentado por el estudiante **Justo Antonio Pérez Medrano (Jr)**, CUI **2161863311401** y Reg. Académico No. **201020931** y luego de haberlo revisado en su totalidad, procede a la autorización del mismo.

"Id y Enseñad a Todos"

Ing. Gilberto Enrique Morales Baiza.
Director
Escuela de Ingeniería Mecánica



Guatemala, febrero de 2020

/aej

Universidad de San Carlos
de Guatemala

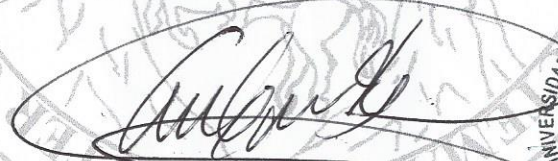


Facultad de Ingeniería
Decanato

Ref.DTG.077.2020

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica, al trabajo de graduación titulado: **SISTEMA DE GESTIÓN DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO BASADO EN RCM PARA LA REDUCCIÓN DE FALLAS DE LA MAQUINARIA DE UNA CENTRAL HIDROELÉCTRICA**, presentado por el estudiante universitario: **Justo Antonio Pérez Medrano (Jr)** y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.


Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
Decana



Guatemala, febrero de 2020

/asga

ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por ser pilar angular de mi hogar y vida. Por proveerme cada oportunidad de ser mejor persona cada día.
- Mis padres** Justo Antonio Pérez y Adela Medrano de Pérez.
Por ser guía, ejemplo y motivación diaria.
- Mis hermanos** Martha Rosario Pérez y Max Francisco Pérez.
Por sus consejos y acompañamiento.
- Mi novia** Silda María Mora Recinos. Por darle un giro completo a mi vida.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala Por brindarme educación profesional y de calidad.

Facultad de Ingeniería Por brindarme buenos catedráticos, desarrollar habilidades y crear conocimientos en mi persona.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN.....	XIII
OBJETIVOS.....	XV
INTRODUCCIÓN	XVII
1. ANTECEDENTES GENERALES	1
1.1. Mantenimiento	1
1.1.1. Mantenimiento correctivo.....	11
1.1.2. Mantenimiento preventivo.....	22
1.1.3. Mantenimiento predictivo.....	25
1.2. Funciones del mantenimiento.....	33
1.2.1. Clases de mantenimiento	33
1.2.2. Confiabilidad operacional	34
1.3. Análisis de modo y efectos de falla	34
1.3.1. Procedimiento para la elaboración del AMEF.....	34
1.3.2. Árbol lógico de decisiones	36
1.3.3. Hoja de decisión RCM.....	37
2. SERVICIO DE MANTENIMIENTO	39
2.1. Indicadores de productividad.....	39
2.1.1. Actividad de mantenimiento.....	39
2.1.2. Porcentaje de tiempo de parada.....	39
2.1.3. Disponibilidad del equipo.....	40

2.2.	Indicadores de mantenimiento	40
2.2.1.	Actividad de mantenimiento	40
2.2.2.	Porcentaje de tiempo de parada	41
2.2.3.	Disponibilidad del equipo.....	42
3.	PROGRAMA DE MANTENIMIENTO	43
3.1.	Puntos críticos de fallas en las máquinas	43
3.1.1.	Diagrama de Ishikawa	43
3.1.2.	Diagrama de Pareto	46
3.1.3.	Resolución de caso	47
3.1.4.	Resultado de la evaluación	48
3.2.	Gestión de mantenimiento	49
3.2.1.	Mantenimiento basado en RCM	49
3.2.2.	Identificación de maquinaria.....	50
3.2.3.	Condiciones de la maquinaria	50
3.2.4.	Mantenimiento preventivo de la maquinaria	53
3.3.	Metodología del RCM.....	54
3.3.1.	Identificación de acciones de mantenimiento	54
3.3.2.	Plan de mantenimiento.....	54
3.3.3.	Cronograma de actividades.....	58
3.3.4.	Indicadores de gestión de mantenimiento	58
3.3.5.	Auditoría de operaciones.....	58
4.	SEGUIMIENTO DEL PROYECTO.....	59
4.1.	Formulario para el proceso de inspección.....	59
4.1.1.	Orden de inspección	59
4.1.2.	Informe de inspección	63
4.2.	Análisis de modo de falla y efectos AMFE	64
4.2.1.	Análisis de costo beneficio de la propuesta.....	65

4.2.2.	Mantenimiento RCM	66
4.2.3.	Actualización del personal contratado	68
4.2.4.	Análisis costo-beneficio de la propuesta de implementación de un sistema de gestión de mantenimiento preventivo basado en RCM.....	68
CONCLUSIONES		71
RECOMENDACIONES		73
BIBLIOGRAFÍA		75

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Árbol lógico de decisión para el análisis de fallas	37
2.	Diagrama de Ishikawa.....	44
3.	Diagrama de Pareto	47
4.	Desgaste del rodete	49
5.	Reparación de álabes	51
6.	Pista de ajuste.....	52
7.	Balanceo dinámico de rodete.....	53
8.	Cronograma de actividades	58
9.	Formato de hoja de información de RCM para el análisis de modos y efectos de fallas AMEF.....	67
10.	Hoja de decisión RCM.....	67

TABLAS

I.	Ponderación de causas que provocan las devoluciones.....	45
II.	Datos de análisis de Pareto	46
III.	Operación del sistema de mantenimiento	60
IV.	Informe de inspección	63
V.	Resumen costos compra rodete	65
VI.	Resumen de costos del reacondicionamiento.....	66
VII.	Flujo de caja.....	68
VIII.	Valor presente neto.....	69
IX.	Tasa interna de retorno	69

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
°C	Grados Celsius
°C/h	Grados Celsius por hora
°	Grados
Hz	Hercio
h	Hora
=	Igual que
kW	Kilovatio
km	Kilómetro
kV	Kilovoltio
>	Mayor que
MW	Megavatio
MWh	Megavatio hora
<	Menor que
m	Metro
m^3	Metro cúbico
m^3/s	Metro cúbico por segundo
m.s.n.m.	Metros sobre el nivel del mar
'	Pies o minutos
mm	Milímetro
Mo	Molibdeno
Ni	Níquel

N	Norte
O	Oeste
%	Porcentaje
P	Potencia
“	Pulgadas o segundos
Q	Quetzales
S	Sur
Ns	Velocidad angular o velocidad específica
W	Vatio

GLOSARIO

AMM	Administrador del Mercado Mayorista.
Aporte	Se refiere a la transferencia de material del electrodo al rodete por medio de la soldadura.
AWS	Asociación Americana de Soldadura.
Axial	En dirección al eje.
Caída	Diferencial de altura entre el embalse y el punto donde está la turbina.
Cangilón	Álabes o paletas unidos al rodete.
Casa de Máquinas	Infraestructura en donde se encuentra la o las turbinas de una Central Hidroeléctrica.
Cota	Número que indica la altura de un punto sobre el nivel del mar.
Desfogue	Cota más baja de un complejo hidroeléctrico, punto en donde se regresa el agua al cauce del río.
Embalse	Acumulación de agua debido a una presa.

Energía cinética	Energía debida a un movimiento determinado.
Energía potencial	Energía que contiene el agua debido a la altura y es aprovechable para generar electricidad a partir de la misma.
FIE	Fecha de inicio de exploración, autorización emitida por el Ministerio de Energía y Minas para autorizar la exploración o construcción de una Hidroeléctrica.
GLP	Gas Licuado de Petróleo, Propano.
IEMA	Impuesto a las Empresas Mercantiles y Agropecuarias.
IVA	Impuesto al Valor Agregado.
INDE	Instituto Nacional de Electrificación.
Inyector	Dispositivo que abre, cierra y direcciona el flujo de agua hacia los cangilones.
MAG	Metal Active Gas, soldadura de electrodo continuo que usa un gas activo en su proceso.
MIG	Metal Inert Gas, soldadura de electrodo continuo que usa un gas inerte en su proceso.
PLC	Controlador Lógico Programable.

Presa	Obstáculo que tiene como objetivo elevar el nivel del agua a una cota específica.
Recurso hídrico	Agua.
RPM	Revoluciones por minuto.
Rodete	Elemento rotativo dentro de una turbina hidráulica.
SNI	Sistema Nacional Interconectado.
SAT	Superintendencia de Administración Tributaria.
Spot	Costo del MWh en Guatemala.
Tensión	Diferencia de potencial eléctrico entre dos puntos, medida en Voltios.
Transformador	Dispositivo eléctrico que permite aumentar o disminuir la tensión en un circuito eléctrico.
Turbina hidráulica	Aprovecha la energía de un fluido y la convierte en energía mecánica rotativa.
UTM	Sistema de coordenadas universal transversal de mercator.

RESUMEN

El plan de mantenimiento está previsto para conocer el estado actual y la evolución futura de los equipos principales de la central. Para ello se colectará la mayor cantidad de información de cómo el funcionamiento afecta a la vida de la turbina y de los demás equipos, para detectar cualquier anomalía antes de que origine un grave daño y una parada no programada.

Un programa de RCM debe garantizar las funciones principales asociadas al activo en su actual contexto operacional, determinar qué debe hacerse si no se encuentra una tarea proactiva adecuada y para prevenir o para predecir las fallas, tareas probables e intervalos de las tareas.

OBJETIVOS

General

Realizar un sistema de gestión de mantenimiento preventivo basado en RCM para la reducción de fallas de la maquinaria de una central hidroeléctrica.

Específicos

1. Describir la situación actual de la empresa en el proceso de mantenimiento preventivo de la maquinaria.
2. Determinar las causas principales del problema de demoras por mantenimiento.
3. Establecer un sistema de gestión de mantenimiento preventivo, basándose en la metodología de mantenimiento centrado en la confiabilidad RCM.

INTRODUCCIÓN

Un aspecto favorable de la filosofía del RCM es que promueve el uso de las nuevas tecnologías desarrolladas para el campo del mantenimiento. La aplicación adecuada de las nuevas técnicas de mantenimiento bajo el enfoque del RCM, permite de forma eficiente optimizar los procesos de producción y disminuir al máximo los posibles riesgos sobre la seguridad personal y el ambiente que traen consigo los fallos de los activos en un contexto operacional específico.

1. ANTECEDENTES GENERALES

1.1. Mantenimiento

En todos los tiempos, el ser humano ha sentido la necesidad de mantener sus máquinas y equipos de trabajo en óptimas condiciones. Por lo general, los desperfectos obedecían porque el operador manejaba de forma inadecuada el equipo. Una vez que el equipo fallaba, se le aplicaba el mantenimiento correspondiente. A esta acción se le llamó mantenimiento reactivo o de ruptura, también se le conoce como mantenimiento correctivo.

En el siglo XX, un grupo de ingenieros japoneses iniciaron un concepto de mantenimiento basado en las recomendaciones del fabricante del equipo. Estas recomendaciones se referían a las limitaciones del equipo, forma y cantidades de trabajo al día, tipo de mantenimiento, forma de operar, maquinarias y materiales a utilizar en el mantenimiento.

A esta tendencia se le llamó mantenimiento preventivo. Su práctica se extendió a otros campos dentro de la empresa, ya que muchos gerentes de planta se interesaron en aplicar estos conceptos en departamentos, como mecánica, electricidad, transportación entre otros.

En el año 1970 surge la globalización del mercado, que generó el interés de las compañías por ser más competitivas y escalar niveles más altos en comparación con las demás empresas.

A partir del año 1990, los sistemas de mantenimiento cobran interés como parte integral del sistema de producción y como apéndice del sistema de calidad total, que muchas empresas utilizan eficazmente.

En el año 2002, el mantenimiento industrial entrenaba, como al inicio, departamentos específicos y a todo el conglomerado de la empresa, desde sus gerentes y administradores hasta la persona que hace la operación más simple.

En los comienzos del siglo XX, los estudios realizados por el científico Frederic W. Taylor cambiaron las malas aplicaciones que existían en las empresas antiguas. A partir de sus observaciones empíricas diseñó métodos de trabajo donde la persona y la máquina eran una sola entidad, una unidad inspirada por un salario atractivo para operar la máquina de acuerdo con las instrucciones requeridas. Palencia García (2010).

A continuación, se detallan algunas conceptualizaciones relacionadas con la palabra mantenimiento, así como el alcance de esta:

- Mantenimiento es asegurar que todo activo continúe desempeñando las funciones deseadas.
- De manera sencilla, es el conjunto de trabajos necesarios para asegurar el buen funcionamiento de las instalaciones.
- De manera precisa, es un conjunto de técnicas y sistemas que permiten prever las averías, efectuar revisiones, engrases y reparaciones eficaces, dando a la vez normas de buen funcionamiento a los operadores de las máquinas, a sus usuarios, contribuyendo a los beneficios de la empresa.

Es un órgano de estudio que busca lo más conveniente para las máquinas, tratando de alargar su vida de forma rentable.

- ¿Por qué mantener? Las razones o los fundamentos por los cuales se realiza mantenimiento a los equipos pueden ser resumidas en las siguientes categorías (sobre la base de los beneficios logrados).
 - Prevenir o disminuir el riesgo de fallas: busca bajar la frecuencia de fallas y disminuir sus consecuencias (incluyendo todas sus posibilidades). Esta es una de las visiones más básicas del mantenimiento y en muchas ocasiones es el único motor que mueve las estrategias de mantenimiento de algunas empresas, olvidándose de otros elementos de interés nombrados abajo.
 - Recuperar el desempeño: con el uso de los equipos el desempeño se puede ver deteriorado por dos factores principales: pérdida de capacidad de producción y aumento de costos de operación.
 - Aumentar la vida útil/diferir inversiones: la vida útil de algunos activos se ve seriamente afectada por la frecuencia/calidad del mantenimiento. Por otra parte, se pueden diferir grandes inversiones, como por ejemplo reconstrucciones de equipos mayores. Encontrar el punto exacto de máximo beneficio económico es de suma importancia aquí.

- Seguridad, ambiente y aspectos legales: muchas tareas de mantenimiento están dirigidas a disminuir ciertos problemas que puedan acarrear, responsabilidades legales relativas a medio ambiente y seguridad. El valor de dichas tareas es difícil de evaluar. El uso de herramientas avanzadas de computación ha permitido en algunos casos evaluar la relación costo/riesgo y así determinar los intervalos óptimos de mantenimiento.
- Factor brillo: la imagen pública, aspectos estéticos de bienes, la moral de los trabajadores, entre otros, son factores importantes al elegir tareas e intervalos de mantenimiento. Por ejemplo, la pintura de una fachada de edificio: el intervalo entre pintadas es modulado más por la apariencia, que por el deterioro de la estructura por baja protección.
- Gestión del mantenimiento
 - El mantenimiento es un sistema que agrupa actividades, que, al ser ejecutadas, permiten alcanzar un mayor grado de confiabilidad en los equipos de una instalación industrial. Por lo tanto, los recursos humanos, económicos y físicos que son destinados para la realización de dichas actividades, deben ser administrados de la forma más eficiente posible.

La gestión del mantenimiento comprende un sistema organizativo orientado a la administración y canalización adecuada de los recursos asignados al departamento de mantenimiento en una empresa.

Este sistema organizativo del mantenimiento busca alcanzar los siguientes objetivos.

- Optimización de la disponibilidad del equipo productivo.
 - Disminución de los costos de mantenimiento.
 - Optimización de los recursos humanos.
 - Maximización de la vida de la máquina.

- Control del mantenimiento: las actividades destinadas a ejercer control directo sobre las tareas de mantenimiento, correctivo o preventivo, se clasifican como mecanismos para el control del mantenimiento. Con estas tareas, se genera una supervisión al equipo físico de la planta, los repuestos, herramientas, mano de obra y el control de los costos de mantenimiento, para garantizar la adecuada ejecución del plan de mantenimiento.

- Los mecanismos comúnmente utilizados para este propósito son:
 - El inventario: es una herramienta para el personal de gerencia con la cual se determina la dimensión de los equipos de trabajo de producción y mantenimiento, la cualificación requerida por los integrantes de estos y la determinación de las herramientas y repuestos necesarios.

De manera similar, el registro es una colección de la información del equipo de la planta. Sin embargo, este es un registro a mayor escala debido a que incluye la información necesaria para comparar, mantener y analizar las condiciones operativas de las máquinas desde una misma fuente de almacenamiento de datos.

La importancia de un registro radica en la gran cantidad de información que almacenan las maquinas en una sola base de datos. Idealmente un registro debe incluir la siguiente información:

- Datos de construcción, manuales, catálogos y diseños.
 - Datos de compra de la maquinaria, solicitudes y costos.
 - Datos de origen, fabricante, proveedor, tipo, modelo.
 - Datos de transporte y almacenamiento.
 - Datos de operación, características normales y límites operativos.
 - Datos de mantenimiento, lubricantes, repuestos en general, curvas características y recomendaciones del fabricante.
- Lista de instrucciones: son actividades sistemáticas en las cuales se describe en términos sencillos los procedimientos a seguir para realizar inspecciones de mantenimiento preventivo o actividades de reparación programadas en máquinas

Estas instrucciones pueden estar estructuradas dentro de una lista de chequeo para registrar el cumplimiento adecuado de cada tarea de mantenimiento.

Las instrucciones que incluyen estas listas pueden ser específicas, es decir, las recomendadas por fabricantes de los equipos. Son las tareas para ejecutarse y que solamente son útiles en los equipos para los cuales fueron creadas, o bien, pueden ser de carácter genérico, tareas que pueden ser ejecutadas en cualquier equipo con características operativas similares.

Los beneficios que conlleva la implementación de este mecanismo de control son:

- Se garantiza que el equipo está recibiendo el mantenimiento adecuado, según sus características particulares de operación.
 - El mantenimiento se realiza sistemáticamente y no de forma errática. Esto asegura buenos resultados económicos a largo plazo y mayor vida útil de los equipos.
-
- Órdenes de trabajo: cuando se realiza una tarea de mantenimiento, es necesario introducir en una base de datos la información relacionada al tipo de actividad realizada, la falla ocurrida, los recursos humanos y materiales utilizados y demás datos que ayuden a evaluar la eficiencia en las labores de mantenimiento y a determinar los costos asociados a dichas actividades de mantenimiento.
 - La gestión del mantenimiento se beneficia de las órdenes de trabajo debido a que estas son el punto de partida de todos los análisis de ingeniería del mantenimiento. El formato de una orden de trabajo está condicionado por las necesidades y magnitud de la empresa. Para cada caso particular, la complejidad de una orden de trabajo está en función de la cantidad y tipo de información requerida.

- Historial del equipo: abarca al registro de los materiales utilizados, registro de fallas ocurridas y registro de los costos asociados a las actividades de mantenimiento a través del tiempo. Con el avance tecnológico que se tiene hoy en día, la administración y almacenamiento de este tipo de información resulta sencilla por el uso de programas especializados para la gestión del mantenimiento.
- Índice de desempeño: son parámetros numéricos que permiten evaluar el rendimiento de un plan de gestión del mantenimiento y de los equipos de una planta a través de periodos de tiempo establecidos. Estas evaluaciones son posibles debido a las relaciones matemáticas que guardan ciertos indicadores operacionales con respecto de otros.
- Actividades de un departamento de mantenimiento
 - Las actividades que se desarrollan en un departamento de Mantenimiento son diferentes en cada compañía, institución o empresa; tomando en consideración aspectos tales como:

Número, tipo o tamaño de las edificaciones que utiliza en sus procesos productivos; políticas internas de la empresa relacionada con las labores de manutención; estándar de acabados establecido en la empresa; mantenimiento, estructuración y capacidad operativa con recursos propios y políticas de tercerización (*outsourcing*); disponibilidad de servicios de mantenimiento en el medio en que se desarrollan las operaciones y otros factores particulares que están relacionados incluso con el giro del negocio de la organización.

En función de los parámetros anteriores las tareas de mantenimiento se dividen en:

- Funciones primarias
 - ✓ Mantenimiento de las edificaciones existentes en la institución y de sus instalaciones.
 - ✓ Mantenimiento de los diferentes equipos existentes en las edificaciones.
 - ✓ Inspección y lubricación de maquinarias, equipos en general (Mantenimiento Preventivo) de acuerdo con las condiciones estándares y recomendaciones del fabricante.
 - ✓ Ejecución de las operaciones estándares tanto de mantenimiento preventivo como correctivo.
 - ✓ Modificaciones a los equipos y edificios existentes (mantenimiento de modernización).
 - ✓ Nuevas instalaciones en los equipos y edificios (Mantenimiento de Desarrollo).
 - ✓ Inspecciones programadas y aleatorias de las edificaciones, maquinarias, equipos y en general los sistemas y equipamiento complementario de la organización (mantenimiento predictivo).
- Funciones secundarias:
 - ✓ Almacenamiento, bodegas de *stock*: insumos, materiales y repuestos.
 - ✓ Protección de las plantas, edificaciones en general. Seguridad Industrial.

- ✓ Disposición de desperdicios.
- ✓ Recuperación y programas de reciclaje.
- ✓ Administración y manejo de seguros.
- ✓ Servicios administrativos varios. Programas de uso racional de recursos, insumos y materiales.
- ✓ Manejo de inventarios de activos fijos.
- ✓ Eliminación y control permanente de contaminantes y ruidos.
- ✓ Cualquier otro servicio que abarque a las diferentes ingenierías de mantenimiento por la administración de la gestión de Manutención de las edificaciones, instalaciones o equipos existentes.

Vale destacar y puntualizar que a esta lista se pueden incluir muchas más funciones secundarias, como compras y adquisiciones directas, control de plagas de insectos, etc.; funciones las cuales dependerán del tipo de organización interna, de la estructura y del tamaño de la empresa que se esté analizando; así como las políticas que los directivos establezcan con relación a las actividades de mantenimiento que se deben ejecutar en la organización por parte de la unidad respectiva. Palencia García (2010).

- Compromisos del área de mantenimiento
 - Difundir permanentemente el rol protagónico de la incidencia del usuario en las labores de mantenimiento y su participación directa e indirecta en el proceso.

- Dar más autonomía a los especialistas de cada una de las unidades técnicas de mantenimiento, permitiéndoles intervenir en las decisiones generales del área de mantenimiento y en las decisiones específicas del día a día.
- Revisar procesos (permanentemente) de mantenimiento, adaptándolos siempre a los requerimientos y necesidades de los clientes internos de la organización.
- Asegurar la disponibilidad de maquinarias, equipos, instalaciones, edificaciones y en general servicios de Manutención, de tal forma que se evite detenciones e interferencias en los procesos productivos o de servicio

1.1.1. Mantenimiento correctivo

Históricamente, el mantenimiento nace como servicio a la producción. Lo que se denomina primera generación del mantenimiento cubre el período que se extiende desde el inicio de la revolución industrial hasta la Primera Guerra Mundial. En estos días la industria no estaba altamente mecanizada, por lo que el tiempo de paro de máquina no era de mayor importancia. Esto significaba que la prevención de las fallas en los equipos no era una prioridad para la mayoría de los gerentes.

A su vez, la mayoría de los equipos eran simples, y una gran cantidad estaba sobredimensionada. Esto hacía que fueran fiables y fáciles de reparar. Como resultado, no había necesidad de un mantenimiento sistematizado más allá de limpieza y lubricación y, por ello, la base del mantenimiento era correctiva. Las posteriores generaciones del mantenimiento trajeron el preventivo sistemático, el predictivo, el proactivo y el mantenimiento basado en fiabilidad.

Aun así, gran parte de las empresas basan su mantenimiento exclusivamente en la reparación de averías que surgen, e incluso algunas importantes empresas sostienen que esta forma de actuar es la más rentable. En otras muchas, las tareas correctivas suponen un alto porcentaje de su actividad y son muy pocas las empresas que han planteado como objetivo reducir a cero este tipo de tareas (objetivo cero averías) y muchas menos las que lo han conseguido.

Existen dos formas diferenciadas de mantenimiento correctivo: el programado y no programado. La diferencia entre ambos radica en que, mientras el no programado supone la reparación de la falla inmediatamente después de presentarse, el mantenimiento correctivo programado o planificado supone la corrección de la falla cuando se cuenta con el personal, las herramientas, la información y los materiales necesarios y además el momento de realizar la reparación se adapta a las necesidades de producción.

La decisión entre corregir un fallo de forma planificada o de forma inmediata suele marcarla la importancia del equipo en el sistema productivo: si la avería supone la parada inmediata de un equipo necesario, la reparación comienza sin una planificación previa. Si, en cambio, puede mantenerse el equipo o la instalación operativa aún con ese fallo presente, puede posponerse la reparación hasta que llegue el momento más adecuado.

La distinción entre correctivo programado y correctivo no programado afecta en primer lugar a la producción. No tiene la misma afección el plan de producción si la parada es inmediata y sorpresiva que si se tiene cierto tiempo para reaccionar. Por tanto, mientras el correctivo no programado es claramente una situación indeseable desde el punto de vista de la producción, los

compromisos con clientes y los ingresos, el correctivo programado es menos agresivo con todos ellos.

- El correctivo como base del mantenimiento: muchas empresas optan por el mantenimiento correctivo, es decir, la reparación de averías cuando surgen, como base de su mantenimiento: más del 90 % del tiempo y de los recursos empleados en mantenimiento se destinan a la reparación de fallos. El mantenimiento correctivo, como base del mantenimiento, tiene algunas ventajas indudables:
 - No genera gastos fijos.
 - No es necesario programar ni prever ninguna actividad.
 - Solo se gasta dinero cuanto está claro que se necesita hacerlo.
 - A corto plazo puede ofrecer un buen resultado económico.

Hay equipos en los que el mantenimiento preventivo no tiene ningún efecto, como los dispositivos electrónicos.

Por ello, muchas empresas prefieren el mantenimiento correctivo. No obstante, el correctivo también presenta inconvenientes

- La producción se vuelve impredecible y poco fiable. Las paradas y fallos pueden producirse en cualquier momento. Desde luego, no es recomendable basar el mantenimiento en las intervenciones correctivas en plantas con un alto valor añadido del producto final, en plantas que requieren una alta fiabilidad (p. ej., empresas que utilizan el frío en su proceso), las que tienen unos compromisos de producción con clientes sufriendo importantes penalizaciones en caso de incumplimiento

- Supone asumir riesgos económicos que, en ocasiones, pueden ser importantes.
- La vida útil de los equipos se acorta.
- Impide el diagnóstico fiable de las causas que provocan la falla, pues se ignora si falló por mal trato, por abandono, por desconocimiento del manejo, por desgaste natural, entre otros. Por ello, la avería puede repetirse una y otra vez.
- Hay tareas que siempre son rentables en cualquier tipo de equipo. Difícilmente, puede justificarse que no se realice, con base en criterios económicos: los engrases, las limpiezas, las inspecciones visuales y los ajustes. Determinados equipos necesitan además de continuos ajustes, vigilancia, engrase, incluso para funcionar durante cortos periodos de tiempo.
- Los seguros de maquinaria o de gran avería suelen excluir los riesgos derivados de la no realización del mantenimiento programado indicado por el fabricante del equipo.
- Las averías y los comportamientos anormales arriesgan la producción y pueden suponer accidentes con riesgos para las personas o para el medio ambiente.
- Basar el mantenimiento en la corrección de fallos supone contar con técnicos muy cualificados, con un *stock* de repuestos importante, con medios técnicos muy variados, entre otros.

En la mayor parte de las empresas, difícilmente, las ventajas del correctivo puro superarán a sus inconvenientes. La mayor parte de las empresas que basan su mantenimiento en las tareas de tipo correctivo no han analizado en profundidad si esta es la manera más rentable y segura de abordar el mantenimiento, y actúan así por otras razones.

- Las empresas deciden externalizar la reparación de averías en los siguientes cinco casos:
 - Cuando está incluido en el contrato: cuando el servicio está incluido dentro de un contrato de gran alcance, como un contrato integral o un contrato de operación y mantenimiento, por ejemplo.
 - Cuando no existe un departamento de mantenimiento: cuando no se dispone de ningún tipo de estructura de mantenimiento. En estos casos, cualquier problema que no sea sencilla ha de ser contratado a una empresa de mantenimiento.
 - Cuando supone una carga inadmisibles de trabajo adicional: cuando disponiendo de una estructura de mantenimiento esta está infra dimensionada, está desbordada de trabajo o cuando supone un aumento puntual de la carga de trabajo insostenible.
 - Cuando no se tienen los medios o los conocimientos necesarios: cuando no se dispone de conocimientos o medios técnicos suficientes para abordar la reparación, por ser tecnologías novedosas y desconocidas en la planta o por haber recibido la formación y entrenamiento necesario.

- Cuando el equipo está en garantía: en el caso de equipos en garantía se prefiere contar con el servicio técnico del suministrador para evitar conflictos de responsabilidad.
- Los contratos que se pueden establecer para la reparación de averías pueden ser los siguientes:
 - Contratación de una reparación puntual sin presupuesto previo. Se trata, en general, de averías graves y urgentes, de un coste menor que las pérdidas de producción que provoca. Por esa razón, se encarga el trabajo a una empresa con capacidad para dar la asistencia técnica sin conocer siquiera el importe de la reparación: el factor más importante es pues el tiempo de intervención.
 - Contratación de una reparación puntual con presupuesto previo. O bien no se trata de intervenciones tan urgentes como las anteriores o bien se prevé un importe elevado que es necesario conocer con antelación. La preparación del presupuesto y su posterior aceptación supone retrasar mucho la intervención, ya que será necesario que el contratista compruebe el trabajo, haga su valoración, redacte una oferta, la envíe al cliente, que éste la estudie y la acepte y le comunique la aceptación al contratista.

El factor más importante en este tipo de contratación es el precio, por encima del tiempo de inicio de los trabajos o de intervención.

- Contratación de asistencias técnicas puntuales, pero a precio pactado bien por servicio (también llamado 'por precios unitarios') o bien por hora de intervención y materiales empleados. Las fases de presupuesto y aceptación de este se realizan una sola vez para muchas intervenciones, de manera que, cuando se necesita un servicio se solicita sin más, conociendo el cliente más o menos qué coste supondrá. El factor importante vuelve a ser el precio, pero el cliente trata de evitar los tiempos muertos derivados del proceso de oferta y aceptación, negociando de una vez todos los servicios que pueda necesitar en un periodo determinado.
- Contratación de un número de servicios de reparación anual. Es decir, por un precio pactado se incluyen ciertas intervenciones anuales de un determinado tipo, o cierta cantidad de horas de intervención.
- Contratación del mantenimiento correctivo dentro de un contrato de mayor alcance, como un contrato integral o un contrato de operación y mantenimiento.
- El objetivo del análisis de fallos: el análisis de averías tiene como objetivo determinar las causas que han provocado determinadas averías (sobre todo las averías repetitivas y aquellas con un alto coste) para adoptar medidas preventivas que las eviten. Es importante destacar esa doble función del análisis de averías:
 - Determinar las causas de una avería.
 - Proponer medidas que las eviten, una vez determinadas estas causas.

- Es importante recopilar todos los datos posibles disponibles, entre ellos, los siguientes:
 - Relato pormenorizado en el que se cuente qué se hizo antes, durante y después de la avería. Detalle de la hora cuando se produjo, el turno que estaba presente (incluso los operarios que manejaban el equipo) y las actuaciones que se llevaron a cabo en todo momento.
 - Detalle de todas las condiciones ambientales y externas a la máquina: temperatura exterior, humedad (si se dispone de ella), condiciones de limpieza del equipo, temperatura del agua de refrigeración, humedad del aire comprimido, estabilidad de la energía eléctrica (si hubo cortes, micro cortes, o cualquier incidencia detectable en el suministro de energía), temperatura del vapor (si el equipo necesita de este fluido) y, en general, las condiciones de cualquier suministro externo que el equipo necesite para funcionar.
 - Últimos mantenimientos preventivos realizados en el equipo, detallando cualquier anomalía encontrada.

- Causas de los fallos: son una o varias de estas cuatro:
 - Por un fallo en el material: se considera que se ha producido un fallo en el material cuando, trabajando en condiciones adecuadas una determinada pieza queda imposibilitada para prestar su servicio.

- Por desgaste: se da en piezas que pierden sus cualidades con el uso, pues cada vez que entran en servicio pierden una pequeña porción de material. Es el caso, por ejemplo, de los cojinetes antifricción.
 - Por rotura: se produce cuando se aplican fuerzas de compresión o de estiramiento a una pieza sobrepasando su límite elástico. Es el caso del hundimiento de un puente por sobrepeso, por ejemplo. Las roturas a su vez pueden ser dúctiles o frágiles, dependiendo de que exista o no deformación durante el proceso de rotura. Así, las cerámicas, en condiciones normales presentan roturas frágiles (las piezas pueden encajarse perfectamente tras la rotura), mientras que el aluminio presenta una rotura dúctil, con importantes deformaciones en el proceso que impedirían recomponer la pieza rota por simple encaje de los restos.
- Por un error humano del personal de operación: otra de las causas por las que una avería puede producirse es por un error del personal de producción. Este error a su vez puede tener su origen en:
 - Error de interpretación de un indicador durante la operación normal del equipo, que hace al operador o conductor de la instalación tomar una decisión equivocada.

- Actuación incorrecta ante un fallo de la máquina. Por ejemplo, introducir agua en una caldera caliente en la que se ha perdido en nivel visual de agua; al no conocerse qué cantidad de agua hay en su interior, es posible que esté vacía y caliente, por lo que al introducir agua en ella se producirá la vaporización instantánea, con el consiguiente aumento de presión que puede provocar incluso la explosión de la caldera.
 - Factores físicos del operador: este puede no encontrarse en perfectas condiciones para realizar su trabajo, por mareos, sueño, cansancio acumulado por jornada laboral extensa, o enfermedad.
 - Factores psicológicos, como la desmotivación o los problemas externos al trabajo, influyen enormemente en la proliferación de errores de operación.
 - Falta de instrucciones sistemáticas claras, como procedimientos, instrucciones técnicas, o deficiente implantación de estas.
- Por un error humano del personal de mantenimiento: el personal de mantenimiento también comete errores que desembocan en una avería, una parada de producción o una disminución en el rendimiento de los equipos. Una parte importante de las averías que se producen en una instalación la comete el personal de mantenimiento. Entre los fallos más habituales provocados o

agravados por el propio personal de mantenimiento están las siguientes:

- Observaciones erróneas de los parámetros inspeccionados. En ocasiones se dan por buenos valores alarmantes de determinados parámetros, que aconsejarían.
 - Realización de montajes y desmontajes sin observar las mejores prácticas del sector.
 - No respetar o no comprobar tolerancias de ajuste.
 - No respetar o no controlar pares de apriete.
 - La reutilización de materiales que deben desecharse. Es el caso, por ejemplo, de la reutilización de elementos de estanqueidad.
 - Por el uso de repuestos no adecuados: repuesto no original, que no cumple las especificaciones necesarias, repuesto que no ha sido comprobado antes de ser montado.
 - Por el uso de herramienta inadecuada. El caso más habitual es el empleo de llaves ajustables que provocan en muchos casos el redondeo de cabezas de tornillos.
- Condiciones externas anómalas: cuando las condiciones externas son diferentes a las condiciones en que se ha diseñado el equipo o instalación pueden sobrevenir fallos favorecidos por esas condiciones anormales. Es el caso de equipos que funcionan en condiciones de temperatura, humedad ambiental o suciedad diferentes de aquellas para las que fueron diseñados. También es el caso de equipos que funcionan con determinados suministros (electricidad, agua de refrigeración, agua de alimentación, aire comprimido) que no cumplen unas especificaciones determinadas,

especificaciones en las que se ha basado el fabricante a la hora de diseñar sus equipos. En ocasiones, en una misma avería confluyen varias causas simultáneamente, lo que complica enormemente el estudio del problema y la aportación de soluciones. Es importante tener en cuenta esto, pues con determinar una única causa en muchas ocasiones no se consigue evitar el problema, y hasta que no se resuelven todas las causas que la provocan no se obtienen resultados significativos.

1.1.2. Mantenimiento preventivo

Durante la segunda guerra mundial, el mantenimiento tiene un desarrollo importante debido a las aplicaciones militares, en esta evolución el mantenimiento preventivo consiste en la inspección de los aviones antes de cada vuelo y en el cambio de algunos componentes en función del número de horas de funcionamiento.

- **Características**

Basicamente, consiste en programar revisiones de los equipos, apoyándose en el conocimiento de la máquina en base a la experiencia y los históricos obtenidos de las mismas. Se confecciona un plan de mantenimiento para cada máquina, donde se realizaran las acciones necesarias, engrasan, cambian correas, desmontaje, limpieza, entre otros.

El mantenimiento preventivo es, además, aquel que incluye las siguientes actividades:

- Inspección periódica de activos y del equipo de la planta, para descubrir las condiciones que conducen a paros imprevistos de producción, o depreciación perjudicial.
- Conservar la planta para anular dichos aspectos, adaptarlos o repararlos, cuando se encuentren aun en una etapa incipiente.
- Ventajas del mantenimiento preventivo
 - Disminuye el tiempo ocioso, hay menos paros imprevistos.
 - Disminuye los pagos por tiempo extra de los trabajadores de mantenimiento en ajustes ordinarios y en reparaciones en paros imprevistos.
 - Disminuye los costos de reparaciones de los defectos sencillos realizados antes de los paros imprevistos.
 - Habrá menor número de productos rechazados, menos desperdicios, mejor calidad y por lo tanto el prestigio de la empresa crecerá.
 - Habrá menor necesidad de equipo en operación, reduciendo con ello la inversión de capital y aumenta la vida útil de los existentes.
 - Mayor seguridad para los trabajadores y mejor protección para la planta.
 - Cumplimiento con los cupos y plazos de producción comprometida.

- Conocer anticipadamente el presupuesto de costos de mantenimiento.
- Conocer los índices de productividad por sector.
- Alcance del mantenimiento preventivo
 - Un buen programa de M.P. incluirá la mayor parte de los bienes físicos de la planta; se asegurará de incluir funciones estacionales del equipo mismo.
 - El M.P. es relativamente moderno. El desarrollo y aceptación que ha tenido en los últimos tiempos ha supuesto el que se haya aplicado, en ocasiones, un poco indiscriminadamente.
- Justificación de tener un mantenimiento preventivo: los datos sobre la distribución de descomposturas son básicos e importantes. Las distribuciones de tiempo entre descomposturas muestran la frecuencia con la cual las máquinas funcionan sin necesidad de repararlas, por un número determinado de horas de operación que comúnmente se presentan como distribuciones de fracción de tiempo entre descomposturas que excede a un tiempo de funcionamiento.

Estas distribuciones tienen diferentes formas, dependiendo de la clase de equipo de que se trate. Por ejemplo, una máquina sencilla con pocas piezas móviles tenderá a descomponerse a intervalos casi constantes, a partir de su última reparación; es decir muestra una variabilidad mínima en su distribución del tiempo libre entre descomposturas.

1.1.3. Mantenimiento predictivo

Básicamente, este tipo de mantenimiento consiste en reemplazar o reparar partes, piezas, componentes o elementos justo antes que empiecen a fallar o a dañarse.

Esto es siempre menos costoso y más confiable que el intervalo de mantenimiento preventivo de frecuencia fija, basado en factores como las horas máquina o alguna fecha prefijada.

El combinar mantenimiento preventivo y predictivo ayuda, significativamente, a reducir al mínimo el mantenimiento correctivo no programado o forzado.

El realizar controles aleatorios o basados en la experiencia de los operadores de los equipos y de la gente de mantenimiento, generalmente, es un soporte a la hora de evitar daños mayores o que se produzcan por efecto de las paradas forzadas.

- Las técnicas principales de mantenimiento predictivo y la aplicación de este en maquinaria industrial son:
 - Análisis de vibraciones: el análisis de vibraciones es la técnica principal para supervisar y diagnosticar la maquinaria rotativa e implantar un plan de mantenimiento predictivo.
 - Ultrasonidos aplicados al mantenimiento predictivo: la captación de ultrasonidos es una técnica que se ha desarrollado mucho en

los últimos años, descubra las aplicaciones de esta técnica predictiva.

- Análisis de lubricantes: las técnicas de análisis de lubricantes son fundamentales para determinar el deterioro del lubricante, la entrada de contaminantes y la presencia de partículas de desgaste.
- Análisis de máquinas alternativas: motores y compresores alternativos pueden diagnosticarse con alta precisión a partir de la señal dinámica de la presión, ultrasonidos y vibraciones.
- Descargas parciales en máquinas eléctricas: la técnica del estudio de las descargas parciales se aplica a grandes máquinas eléctricas para evaluar el estado del estator con la máquina en servicio.
- Parámetros de supervisión de grandes máquinas eléctricas: la criticidad de las grandes máquinas eléctricas justifica la monitorización en continuo por varias técnicas complementarias entre sí.
- Termografía: la reducción en los precios de las cámaras termográficas ha permitido que cualquier departamento de mantenimiento se beneficie ya de esta potente técnica predictiva.
- Análisis de motores eléctricos de inducción (ESA&MCA): en los últimos años se han desarrollado tecnologías que, mediante de la

medida simultánea de corriente y tensión, permiten el diagnóstico de motores eléctricos.

- Estrategias de mantenimiento: se distingue entre mantenimiento planificado y mantenimiento no planificado.
 - Mantenimiento planificado: implica proactividad, es decir, plantea una programación de tareas para mitigar el riesgo de se produzca una avería o de que esta genere consecuencias no deseadas. Estas tareas se pueden programar a intervalos fijos (preventivo), según condición (predictivo) o cuando ya se ha producido la avería, pero no se requiere una acción inmediata (reactivo).
 - Mantenimiento no planificado: es el mantenimiento reactivo inmediato. La avería ya se ha producido y se ha de reparar inmediatamente.
 - Mantenimiento reactivo: se conoce como *run to failure* o funcionamiento hasta el fallo, consiste en no programar ninguna tarea hasta que la máquina falla. El mantenimiento reactivo es el tradicional, que se limitaba a actuar como un taller de mantenimiento, concebido bajo la idea de crear una gran capacidad humana que pudiese atender a cualquier imprevisto dentro de las plantas industriales. Es decir, como la aparición de la avería era absolutamente imprevisible, era necesario disponer de un equipo humano libre de obligaciones, salvo la propia de actuar en caso de una emergencia.
- La implantación de un programa de mantenimiento predictivo (PMP): el mantenimiento predictivo, a diferencia de algunos otros tipos de

mantenimiento ya mencionados, requiere una fase inicial de preparación e implantación, así como una disciplina de seguimiento posterior.

- Estudio de la planta: el primer paso será determinar la posibilidad de implantación del P.M.P. Idealmente, antes debe estudiarse la disponibilidad, rentabilidad y tiempo de parada de la planta.
- Selección de máquinas: de esta manera se trabajará con un número manejable de máquinas, de acuerdo con el personal requerido, programas de producción y costos de parada.
- Selección de técnicas óptimas de monitorizado para la determinación precisa del estado de las máquinas: se seleccionan los mejores métodos de medida, el tipo de medida de vibración, la mejor localización para tomar la medida y el instrumento adecuado para el ensayo.
- Establecimiento del programa: una vez establecidas las técnicas óptimas para el control de cada ítem de la planta, se agruparán para formar el programa completo de monitorizado.
- Fijar y revisar límites de aceptabilidad: se establecen los niveles normales de vibración de las máquinas que indican su funcionamiento en condiciones normales y aceptables.
- Mediciones base de las máquinas: dado que inicialmente se desconocen las condiciones mecánicas de las máquinas, se establecen mediciones de partida para cada una. Las mediciones

subsecuentes serán comparadas con estas de referencia, así como con los límites preestablecidos.

- Mediciones periódicas de condición el objetivo de un P.M.P: es detectar un deterioro significativo en el estado de la máquina. Por medio de la adquisición, registro y análisis de la tendencia de los datos medidos, es posible determinar si la máquina está dentro de normas o si es necesario un análisis más detallado para identificar un posible problema.
 - Análisis de situación: es un análisis en profundidad del estado en que la máquina se encuentra y que muchas veces reúne la aplicación de varias técnicas diferentes. El propósito es confirmar la existencia de un problema determinado llevando a cabo el diagnóstico del fallo, así como un pronóstico de sus posibles consecuencias.
 - Corrección del fallo: una vez diagnosticado el fallo, se programarán las medidas correctivas. Los detalles del fallo identificado deberían realimentar el P.M.P. para confirmar el diagnóstico y mejorar la capacidad y eficacia del programa.
- La evolución del mantenimiento predictivo
 - El mantenimiento predictivo se aplicó, inicialmente, en Norteamérica en el año 1958. Para ello, se usaron medidores de vibración sencillos para llevar un seguimiento de las máquinas como se describió antes.

En los últimos años de la década de los setenta y primeros de los 80' el sistema cayó en desuso en determinados sectores por estas razones.

En los últimos años, por la incorporación de los ordenadores personales al ámbito de trabajo, la adquisición y archivo de datos, así como la confección de informes, gráficos de evolución, entre otros, las tareas de seguimiento del programa predictivo se simplificaron. Dado el avance y la superación tecnológica de las empresas para mejorar la calidad y la productividad han propiciado que el mantenimiento predictivo cobre vigencia como herramienta de ahorro de costos y de eficacia total en el funcionamiento de las máquinas involucradas en los diferentes procesos industriales.

- La informatización del mantenimiento predictivo
 - En la actualidad existen equipos portátiles de toma de datos capaces de efectuar mediciones de la vibración y de los parámetros mencionados que afectan al mantenimiento de las máquinas bajo control. Estos equipos portátiles de uso muy simple memorizan las lecturas tomadas en las máquinas durante el proceso de inspección rutinaria. Luego las transmiten a un ordenador por medio de un enlace de comunicación estándar.
 - Cuando la información se ha almacenado en una base de datos en el ordenador, este los ordena. Luego, puede presentar diferentes informes en forma de tabla u otros tipos de gráficos de evolución de la situación mencionada.

La mayor o menor capacidad de manejo y análisis de estos datos reside en la potencia y sencillez de uso del software que se esté utilizando.

En el mercado existen programas para manejar datos simples y para almacenar y manejar la información contenida en la señal compleja de vibración. Facilitan que, mediante el estudio del espectro de esta señal diagnostiquen averías.

La última evolución tecnológica en el campo del software aplicado al predictivo es la inclusión de programas inteligentes que, residiendo en el ordenador, analizan los datos procedentes de las máquinas. Cuando los comparan con las características de diseño de los elementos constituyentes de estas y sus condiciones de operación, emiten inmediata y automáticamente un diagnóstico de la posible avería.

- Selección del sistema de mantenimiento predictivo
 - El sistema de llevar a la práctica el PMP en equipos de medida, ordenador, software y la elección de un equipo portátil, de registro manual o de una instalación automatizada donde el ser humano solo intervenga para tomar decisiones, dependerá de varios factores:
 - Costos por pérdida de producción.
 - Tiempo de desarrollo de un fallo desde su detección.
 - Costo del equipo a proteger.
 - Existencia de equipos de reserva.
 - Disponibilidad de personal.

- Costo de implantación del sistema.

Con estos parámetros, se elige el sistema más adecuado a la necesidad. Luego se requerirá de un sistema mixto, en esta técnica, que está formado por:

- Un equipo portátil, programable y soportado por ordenador para la mayor parte de las máquinas a controlar. Manejado por un auxiliar adquiriría y transmitiría a ordenador periódicamente toda la información de las máquinas seleccionadas.
 - Una serie de sensores permanentemente instalados en aquellos puntos que reúnan particulares condiciones de dificultad de acceso para efectuar una medida precisa y con seguridad para el inspector. La señal de estos sensores sería transmitida a un panel de conexión centralizado, desde el cual se tomarían las lecturas de la forma descrita en el punto 1 y transferida de la misma forma al ordenador.
 - Finalmente, las máquinas que son realmente críticas para la operación de la planta, por alguna de las razones expuestas, deberían ser monitorizadas con un sistema de vigilancia continua 24 horas al día, que alerte de cualquier problema.
- Beneficios del programa de mantenimiento predictivo

- Es evidente que esta técnica, desarrollada hace más de 30 años, habría desaparecido si no fuera por los beneficios que proporciona y que han sido demostrados por miles de usuarios en todo el mundo.
 - Mejora de la productividad.
 - Prolongación del tiempo de operación.
 - Reducción de los costos de mantenimiento reducción de primas de seguro.
 - Equipo de reserva mínimo o innecesario.
 - Operación más tranquila.
 - Aumento de seguridad en la maquinaria.

1.2. Funciones del mantenimiento

Se describen las funciones del mantenimiento

1.2.1. Clases de mantenimiento

Se entiende por mantenimiento correctivo la corrección de las averías o fallas, cuando éstas se presentan.

Es la habitual reparación tras una avería que obligó a detener la instalación o máquina afectada por el fallo. Pastor (1997)

El mantenimiento preventivo es una técnica científica del trabajo industrial, que en especial está dirigida al soporte de las actividades de producción y en general a todas las instalaciones empresarias. Pastor (1997)

En el programa de mantenimiento predictivo se analizan las condiciones del equipo mientras este se encuentra funcionando o en operación. Consiste en el análisis de las operaciones de mantenimiento para su optimización, permitiendo de esta manera ajustar las operaciones y su periodicidad a un máximo de eficiencia.

1.2.2. Confiabilidad operacional

La mejora de los resultados de mantenimiento pasa, necesariamente, por estudiar los incidentes que ocurren en la planta y aportar soluciones para que no ocurran. Si cuando se rompe una pieza, solo se cambia por una similar, probablemente se esté actuando, únicamente, sobre el síntoma, no sobre la causa que produjo la avería. Si una pieza se rompe es necesario sustituirla, pero si se pretende retardar o evitar el fallo es necesario estudiar la causa y actuar sobre ella.

1.3. Análisis de modo y efectos de falla

Se describe los lineamientos para realizar el análisis de modo y efectos de falla.

1.3.1. Procedimiento para la elaboración del AMEF

- AMEF de diseño FMAD. Enumerar qué se espera del diseño del producto, qué quiere y necesita el cliente y cuáles son los requerimientos de producción. Así mismo listar el flujo que seguirá el producto por diseñar, comenzando desde el abastecimiento de materia prima, el (los) proceso(s) de producción hasta la utilización del producto por el usuario final.

- AMEF de procesos AMEFP. Listar el flujo del proceso que se esté desarrollando, comenzando desde el abastecimiento de la materia prima, el proceso de transformación hasta la entrega al cliente (proceso siguiente). Determinar las áreas que sean más sensibles a posibles fallas. En el caso de empresas de servicios no hay materias primas, para estos casos se toman en cuenta entradas del proceso.
- Establecer los modos potenciales de falla. Para cada una de las áreas sensibles a fallas determinadas en el punto anterior se deben establecer los modos de fallas posibles. Modo de falla es la manera en que podría presentarse una falla o defecto. Para determinarlas se plantean las interrogantes ¿De qué forma podría fallar la parte o proceso? (roto, flojo, fracturado, equivocado, deformado, agrietado, mal ensamblado, fugas, mal dimensionado).
- Determinar el efecto de la falla: efecto. Cuando el modo de falla no se previene ni corrige, el cliente o el consumidor final pueden ser afectados. (Deterioro prematuro, ruidoso, operación errática, claridad insuficiente, paros de línea).
- Determinar la causa de la falla
 - Causa. Es una deficiencia que se genera en el modo de falla.
 - Las causas son fuentes de variabilidad asociada con variables de entrada claves.
 - Tolerancias/valores objetivos.
 - Configuración.
 - Componente de modos de falla a nivel de componente.

- Describir las condiciones actuales. Anotar los controles actuales que estén dirigidos a prevenir o detectar la causa de la falla.
 - Análisis de elementos limitados.
 - Revisiones de diseño.
 - Prototipo de prueba.
 - Prueba acelerada.
- Determinar el grado de severidad. Para estimar el grado de severidad, se debe de tomar en cuenta el efecto de la falla en el cliente. Se utiliza una escala de 1 a 10: el “1” indica una consecuencia sin efecto. El “10” indica una consecuencia grave.

1.3.2. Árbol lógico de decisiones

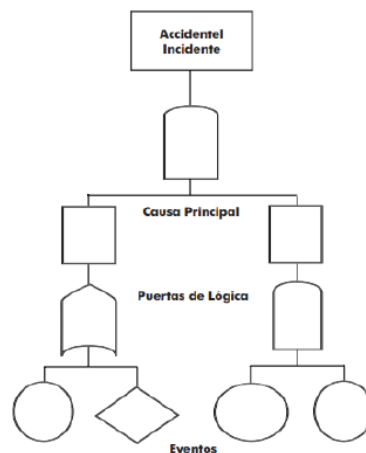
El árbol lógico de decisión se usa para determinar las tareas de mantenimiento aplicables al equipo. El objetivo de estas tareas es identificar y prevenir el deterioro, restaurar el equipo a condiciones aceptables de operación en la que pueda desempeñar la función para la que fue requerida, a través de: lubricación y servicio, chequeos visuales, inspecciones, pruebas funcionales, monitoreo de la condición, restauración y reemplazo. Ricky y Mobley (2003).

El árbol lógico de decisión utiliza un grupo secuencial de preguntas binarias (con respuesta sí/no) para clasificar cada falla funcional, el riesgo es que, si se procede con el análisis con información inadecuada o incompleta, puede llevar a la ocurrencia de fallas o a tener tareas innecesarias. Ricky y Mobley (2003).

Para su elaboración se realiza un diagrama de árbol de fallas. Se parece a un árbol genealógico que inicia con una falla y sigue hacia abajo con las

causas. Cada nivel indica una opción más precisa de falla. El cuestionamiento es en retrospectiva si ¿yo quisiera causar este problema?, ¿cómo lo haría? y se responden todas las posibles formas de hacerlo. Borris (2005).

Figura 1. **Árbol lógico de decisión para el análisis de fallas**



Fuente: elaboración propia.

1.3.3. Hoja de decisión RCM

La hoja de decisión RCM es una herramienta para registrar las respuestas a las preguntas del diagrama de decisión. También posibilita elegir, de manera óptima, la actividad de mantenimiento adecuada para cada máquina, y así eludir posibles efectos de cada modo de falla.

Existe una hoja de decisión RCM, que resume los criterios más importantes e integra todos los procesos de decisión en una estructura estratégica única, puede ser visto en la figura 4 y se aplica a cada uno de los modos de falla listados en la hoja de información RCM.

2. SERVICIO DE MANTENIMIENTO

2.1. Indicadores de productividad

Se describen los indicadores de productividad para los servicios de mantenimiento.

2.1.1. Actividad de mantenimiento

Expresada como el porcentaje dado por la relación entre horas hombre de mantenimiento, divididas por el total de horas hombre en la producción.

$$\text{Actividad de mantenimiento} = \frac{\text{horas} - \text{horas de mantenimiento}}{\text{horas hombre en la producción}}$$

2.1.2. Porcentaje de tiempo de parada

Determinado por la relación entre el total de tiempo de parada por concepto de mantenimiento, sobre el total de tiempo dedicado a producción.

$$\text{Porcentaje de tiempo de parada} = \frac{\text{tiempo de parada por mantenimiento}}{\text{tiempo total de la producción}}$$

2.1.3. Disponibilidad del equipo

Determinada como porcentaje de horas disponibles del equipo para producir, sobre el total de tiempo dispuesto para producción

$$\text{Disponibilidad de equipo} = \frac{\text{horas disponible del equipo}}{\text{tiempo total de la produccion}}$$

2.2. Indicadores de mantenimiento

Son parámetros cuantitativos de control para determinar el comportamiento y la efectividad del sistema de mantenimiento de un sistema productivo, estos parámetros son absolutos o relativos. Palencia (2013)

2.2.1. Actividad de mantenimiento

Es la probabilidad de que un equipo cumpla una misión específica bajo condiciones de uso determinadas en un periodo determinado. El estudio de confiabilidad es el estudio de fallos de un equipo o componente. Si se tiene un equipo sin fallo, se dice que el equipo es ciento por ciento confiable o que tiene una probabilidad de supervivencia igual a uno. Al realizar un análisis de confiabilidad a un equipo o sistema, se obtiene información valiosa acerca de la condición de este: probabilidad de fallo, tiempo promedio para fallo, etapa de la vida en que se encuentra el equipo.

La confiabilidad de una unidad productiva es la garantía o probabilidad de que producirá el producto requerido por sus clientes, se caracteriza por el tiempo promedio entre fallas TPEF.

$$\text{Confiabilidad} - TPEF = \frac{\text{horas de operación}}{\text{número total de fallas}}$$

TPEF: Tiempo promedio entre fallas.

HROP: Horas de operación.

NTFALLAS: Número total de fallas.

2.2.2. Porcentaje de tiempo de parada

Determinado por la relación entre el total de tiempo de parada por concepto de mantenimiento.

El tiempo promedio para reparar es un parámetro de medición asociado a la mantenibilidad, es decir, a la ejecución del mantenimiento. La mantenibilidad, definida como la probabilidad de devolver el equipo a condiciones operativas en un cierto tiempo utilizando procedimientos prescritos. Es una función del diseño del equipo (factores tales como accesibilidad, modularidad, estandarización y facilidades de diagnósticos, facilitan enormemente el mantenimiento). Para un diseño dado, si las reparaciones se realizan con personal calificado y con herramientas, documentación y procedimientos prescritos, el tiempo de reparación depende de la naturaleza del fallo y de las mencionadas características de diseño.

$$TPPR = \text{tiempo de averías} / \text{número de averías}$$

$$\text{tasa de reparación } (\mu) = 1 / TPPR$$

2.2.3. Disponibilidad del equipo

La disponibilidad es una función de la confiabilidad y la mantenibilidad, entre otras palabras con qué frecuencia un equipo fallará y que tanto tiempo tomará regresar al equipo a sus condiciones normales de operación.

La disponibilidad permite estimar en forma global el porcentaje de tiempo en que se puede esperar que un equipo esté disponible para cumplir la función para el cual fue destinado. A través del estudio de los factores que influyen sobre la disponibilidad, el TPEF y el TPPR, es posible para la gerencia evaluar distintas alternativas de acción para lograr los aumentos necesarios de disponibilidad.

$$\text{Disponibilidad} = \text{TPEF} / (\text{TPEF} + \text{TPPR})$$

TPEF: tiempo promedio entre fallas

TPPR: tiempo promedio para reparar

$$\text{TPPR} = \text{tiempo de averías} / \text{número de averías}$$

3. PROGRAMA DE MANTENIMIENTO

3.1. Puntos críticos de fallas en las máquinas

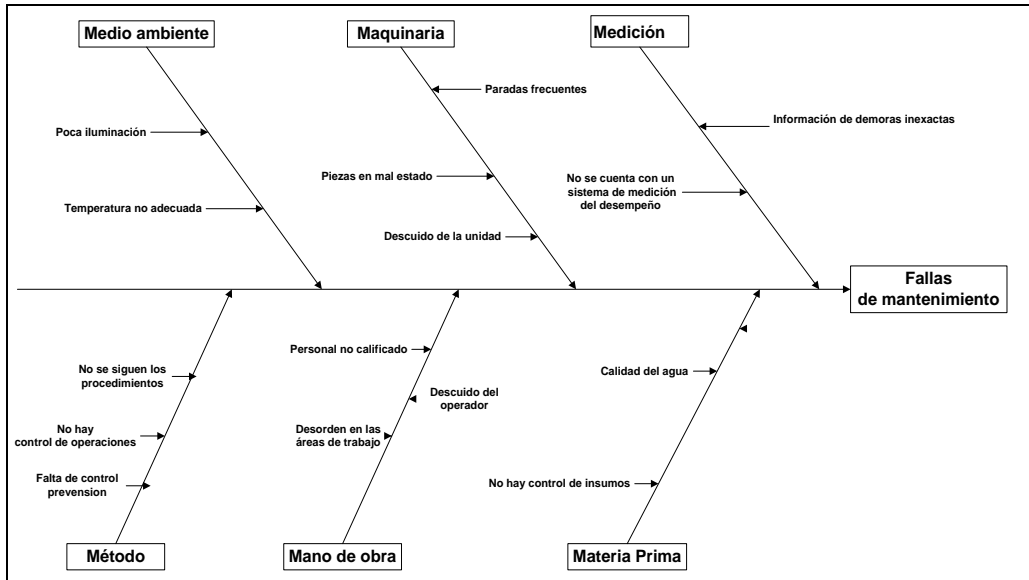
Para diseñar el programa de mantenimiento se analizaron las causas asignables a la falla en los equipos.

3.1.1. Diagrama de Ishikawa

Para analizar detenidamente la parte del proceso de mantenimiento donde se generan los problemas, se realizó una reunión con la gerencia y un grupo de expertos de las áreas de producción y mantenimiento, en la cual, por medio de una lluvia de ideas se conocieron los motivos de las no conformidades detectadas y su influencia en el proceso. De esta manera, se podrán buscar, identificar y analizar las causas principales que provocan el problema de devoluciones en los pedidos. Se identificaron las siguientes:

- Falta de control de rutinas de mantenimiento.
- Poca iluminación.
- Descuido del operador.
- Maquinaria en mal estado.
- Paradas frecuentes.

Figura 2. Diagrama de Ishikawa



Fuente: elaboración propia.

Con el valor asignado a cada causa, según el criterio de cada experto, se obtiene una variante del diagrama causa efecto denominado el diagrama Ishikawa ponderado.

Es importante aclarar que, en esta herramienta, para que una causa sea considerada significativa y de influencia en el problema, el resultado del porcentaje de concordancia C %

$$C = (1 - V_n / V_t) * 100$$

Donde:

C concordancia expresada en %

V_n: cantidad de expertos en contra del criterio predominante

V_t: Cantidad total de expertos

Si se alcanza $C = 60\%$ se acepta un buen nivel de consenso. A continuación, se muestran los resultados:

Tabla I. **Ponderación de causas que provocan las devoluciones**

No.	Motivos	Experto 1	Experto 2	Experto 3	Experto 4	Experto 5	Total	C %
1	Falta de control durante la operación	1	2	1	1	1	6	80
2	No cumple con los procedimientos	2	1	2	3	2	10	60
3	Poca iluminación	4	3	3	5	3	18	60
4	Descuido del operador	3	4	4	4	4	19	80
5	Personal no calificado	5	5	6	2	5	23	60
6	Materia prima	6	8	5	6	6	31	60
7	Maquinaria en mal estado	7	6	7	9	7	36	60
8	Paradas frecuentes	8	7	8	8	8	39	80
9	Descuido de la unidad	9	9	9	7	9	43	80
10	Temperatura no adecuada	11	11	10	11	11	54	80
11	Problemas de seguridad industrial	10	10	11	10	10	51	80
	TOTAL	66	66	66	66	66	330	

Fuente: elaboración propia.

Experto 1 = Gerente General

Experto 2 = Jefe Control de operaciones

Experto 3 = Supervisor

Experto 4 = Coordinador de sistema de calidad

Experto 5 = Asistente de calidad

C (%) = Porcentaje de concordancia

Así, se obtiene que la mayor causa que incide en el proceso de mantenimiento sea la falta de control preventivo.

3.1.2. Diagrama de Pareto

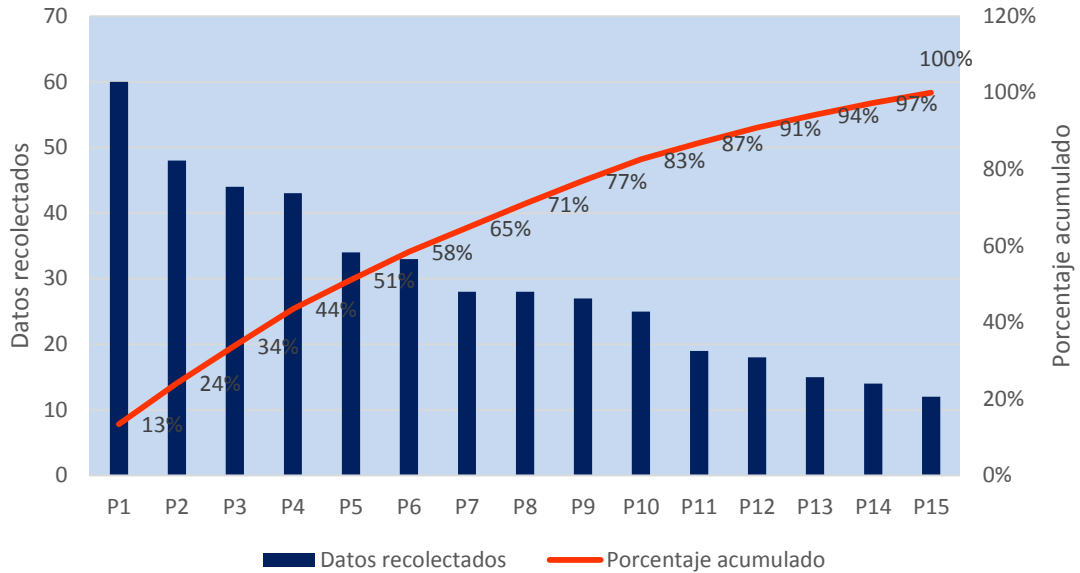
Se presenta el análisis de Pareto efectuado

Tabla II. Datos de análisis de Pareto

Posición real (Causas y datos ordenados)			Frecuencia acumulada	Porcentaje	Porcentaje acumulado
1	Falta de mantenimiento preventivo	60	60	13 %	13 %
2	Falta de control de inventarios de repuestos	48	108	11 %	24 %
3	Manual de mantenimiento	44	152	10 %	34 %
4	Asignación de tareas	43	195	10 %	44 %
5	Seguimiento de las reparaciones	34	229	8 %	51 %
6	Control del proceso	33	262	7 %	58 %
7	Planificación de actividades	28	290	6 %	65 %
8	Registro de mantenimiento	28	318	6 %	71 %
9	Uso de hojas de control	27	345	6 %	77 %
10	Identificación de insumos	25	370	6 %	83 %
11	Procedimientos estándares	19	389	4 %	87 %
12	Descuido del operador	18	407	4 %	91 %
13	Bitácora de operaciones	15	422	3 %	94 %
14	Control de compras de repuestos	14	436	3 %	97 %

Fuente: elaboración propia.

Figura 3. Diagrama de Pareto



Fuente: elaboración propia.

3.1.3. Resolución de caso

El mantenimiento dado a las turbinas puede ser agrupado en tres tipos:

- Mantenimiento predictivo. Monitoreo de indicadores por medio de sensores para identificar señales de sospecha de anomalías tales como vibraciones, presiones, temperaturas, niveles, análisis de partículas y agua en lubricantes, etc. La lectura de indicadores fuera de los rangos permisibles será analizada e interpretada para tomar decisiones en base a las conclusiones.

- Mantenimiento preventivo. Es la programación de procedimientos de para resguardar las condiciones de la maquinaria, inclusive, la reparación de averías cuando todavía la maquinaria se encuentra dentro de límites aceptables con el afán de no incurrir en paradas innecesarias. Este tipo de mantenimiento comprende visitas, revisiones lubricación y limpieza periódicas.
- Mantenimiento correctivo. Son acciones que se realizan para restablecer la operación cuando surge algún problema que, para la maquinaria, aun en las plantas con los mantenimientos predictivo y preventivo eficaces, ocurren imprevistos, por lo que es recomendable tener un equipo para realizar este tipo de mantenimiento.

3.1.4. Resultado de la evaluación

El rodete presenta, generalmente, desgaste en la pista de ajuste con los espaciadores los cuales presentan una alta remoción de material al igual que golpes y desgaste en los alabes. También se encontraron daños en la pista de las cuñas, como se muestran en la figura 4.

Figura 4. **Desgaste del rodete**



Fuente: elaboración propia, Hidroeléctrica El Recreo.

3.2. Gestión de mantenimiento

Se describe la gestión del mantenimiento basado en RCM.

3.2.1. Mantenimiento basado en RCM

Un aspecto favorable de la filosofía del RCM es que promueve el uso de las nuevas tecnologías desarrolladas para el campo del mantenimiento. La aplicación adecuada de las nuevas técnicas de mantenimiento bajo el enfoque del RCM, permiten de forma eficiente, optimizar los procesos de producción y disminuir al máximo los posibles riesgos sobre la seguridad personal y el

ambiente, que traen consigo los fallos de los activos en un contexto operacional específico.

3.2.2. Identificación de maquinaria

Se realizó un diagnóstico para identificar las fallas ocurridas durante el proceso productivo que ocasionan paradas y desfavorecen en tiempo y costos el ritmo de producción.

3.2.3. Condiciones de la maquinaria

La reparación de la turbina se realiza aplicando cordones de material de soldadura a la zona de álabes desgastados. El material se aplica en general con una varilla de soldadura que tiene la misma composición del metal que está constituido el álabe.

Figura 5. **Reparación de álabes**



Fuente: elaboración propia, Hidroeléctrica El Recreo.

Se realiza un refrentado y cilindrado en pista de ajuste con los espaciadores, de igual forma se hace un balance dinámico de rodete y eje como se muestra en la figura 6 y 7.

Figura 6. **Pista de ajuste**



Fuente: elaboración propia, Hidroeléctrica El Recreo.

Figura 7. **Balanceo dinámico de rodete**



Fuente: elaboración propia, Hidroeléctrica El Recreo.

3.2.4. Mantenimiento preventivo de la maquinaria

El mantenimiento actual correctivo hace que la central hidroeléctrica sea susceptible a fallos continuos y a mayor desgaste en el sistema en general y en los componentes que lo conforman, chumaceras, cojinetes de rodamiento, eje, poleas, fajas, etc.

El mantenimiento preventivo se puede realizar por medio de reemplazos calendarizados, dependiendo las horas de trabajo de ciertos elementos, evaluaciones periódicas, lubricación programada, detención general del sistema en determinado momento para una limpieza general abriendo la carcasa de la turbina para observar el inyector, limpieza del álabe regulador, limpieza en el embalse, inspección de canal de llegada, presa de derivación e inspección de tuberías, el mantenimiento preventivo es crítico en el aumento de la eficiencia y en la fiabilidad del sistema de generación de energía eléctrica.

3.3. Metodología del RCM

Se describe la metodología a utilizar para el plan de mantenimiento.

3.3.1. Identificación de acciones de mantenimiento

La gestión del mantenimiento se orienta a la búsqueda de metas comunes que deben ser desarrolladas y entendidas para reducir las restricciones, cuya consecución será el éxito de la empresa y del negocio. Hoy, esta meta común, se basa en la existencia de la conformidad de la calidad de los procesos y la aceptación de los resultados obtenidos, todo bajo el concepto de la excelencia en la organización.

3.3.2. Plan de mantenimiento

- Mantenimiento de presa de derivación: este elemento generalmente necesita de poco mantenimiento, sin embargo, es importante un control en la época de lluvias, esto provoca una elevación en el río, el cual puede llevar consigo materiales, como piedras, vegetación y arena que podrían obstaculizar la entrada de agua al canal. La presa de derivación se compone de una serie de costales de arena apilados unos con otros, así como piedras entre ellos para mejorar la rigidez de la estructura, por lo que una revisión mensual de la estructura es importante para mantener el caudal derivado tan constante como sea posible. En época de lluvias revisiones semanales son importantes, la crecida del río puede llegar a derribar la presa.
- Mantenimiento embalse: el desarenador es una parte importante del embalse al que se le debe dar mantenimiento. Mensualmente se deben

expulsar sedimentos abriendo la compuerta de purga al final del embalse. Esta actividad debe llevarse a cabo con mayor frecuencia en época lluviosa. La compuerta de purga necesita de lubricación en su husillo al menos una vez cada 6 meses y una revisión de la compuerta de lámina, si en caso fuera necesario cambiarla debido a corrosión excesiva en los extremos.

Otro aspecto importante para el mantenimiento del embalse es la rejilla que se encuentra antes de las tuberías forzadas, la cual requiere de una limpieza mensual, la frecuencia de esta actividad dependerá de la cantidad de material extraño arrastrado hacia el embalse, en este caso debe ser más frecuente, debido a la falta de rejilla en la entrada del canal de derivación, por lo que será mayor la cantidad de material extraño conducido por el canal. Estos aspectos son importantes no solo para el mantenimiento general del embalse, sino también, para el funcionamiento óptimo de la turbina, pues es esencial que lo único que atraviese las tuberías forzadas, inyector y rodete sea el agua.

- Mantenimiento tuberías forzadas: en el mantenimiento de las tuberías forzadas, lo importante es considerar el material de cada una, en el caso de la tubería ASTM A536 es importante hacer una revisión mensual de las uniones y buscar goteras, dichas uniones se encuentran en los anclajes de concreto, por lo que inspeccionar por grietas o irregularidades en ellos es importante, en especial por el tiempo de trabajo que tiene la tubería. Para aumentar la vida útil de la tubería, es recomendable una limpieza de la superficie de la tubería, removiendo corrosión con un cepillo de acero y alguna clase de solvente químico especial, para posteriormente aplicar pintura anticorrosiva.

Para la tubería de PVC, lo más importante es la exposición a los rayos ultravioleta procedentes del sol, los cuales son nocivos para este material debido a un deterioro prematuro y un posible agrietamiento por endurecimiento, por lo que en este caso se debe cubrir con vegetación. Mensualmente se debe inspeccionar la vegetación para que no sea demasiada como para ocasionar algún golpe a la tubería, y tampoco debe ser mínima pues la protección contra los rayos del sol no se llevará a cabo.

- Mantenimiento de turbina: las turbinas necesitan de poco mantenimiento, aquí es tomado en cuenta el rodete y el inyector, por lo que un mantenimiento efectivo en el embalse y el canal de derivación es suficiente para la llegada de agua limpia a la turbina. Una inspección anual de los álabes del rodete, así como del álabe regulador en el inyector es importante, buscando indicios de desgaste excesivo que puedan afectar en su funcionamiento.

Los mecanismos de ajuste de los álabes reguladores por su naturaleza manual son inspeccionados a diario.

Como inicio del mantenimiento es necesario abrir el inyector en búsqueda de materiales extraños como bolsas plásticas, vegetación, animales pequeños como roedores, y cualquier tipo de elementos que puedan obstaculizar el paso del agua a través del álabe regulador.

- Mantenimiento en soportes, acoplamientos, rodamientos y fajas

El mantenimiento de soportes, llamados también chumaceras, y acoplamientos, referido a ejes, poleas, fajas y rodamientos, es uno de los más importantes para un funcionamiento óptimo de la turbina, así como

para mantener una eficiencia alta, por lo que deben hacerse chequeos constantes, de preferencia cuando se ajuste el álabe regulador en horas en que comienza la noche, momento en que la turbina requiera de mayor caudal debido al aumento en la carga de potencia requerida (se encienden luces, televisores, radios, entre otros).

El fin principal de los chequeos diarios es detectar vibraciones debido a desalineamientos, tornillos o pernos desajustados debido al fenómeno de la relajación en uniones, tensiones excesivas en fajas e incluso ruido en la casa de máquinas.

El eje de la turbina trabaja con rodamientos rígidos de bolas, estos requieren un mantenimiento relativamente sencillo pero muy importante que en algunos casos se subestima. Los rodamientos deben ser lubricados con grasa, en este caso se utiliza la grasa blanda de consistencia 2, para rodamientos de bola sometidos a velocidades de giro de 26 500 milímetros sobre minuto con espesante de litio por la amplia gama de temperaturas con las que puede trabajar y las excelentes propiedades tanto mecánicas como de viscosidad, se debe trabajar con esta grasa siempre. La cantidad de grasa por utilizar y la frecuencia de lubricación son los aspectos más importantes para un óptimo trabajo de los rodamientos y, por consiguiente, tener una eficiencia mecánica alta, lo cual sin duda ayuda a elevar la eficiencia total.

4. SEGUIMIENTO DEL PROYECTO

4.1. Formulario para el proceso de inspección

Se presenta el formulario para el proceso de inspección de los equipos.



4.1.1. Orden de inspección

Se describe la forma de trabajo con el sistema Systurb, aplicación por aplicación para mostrar el software que se ha desarrollado como herramienta de mantenimiento.

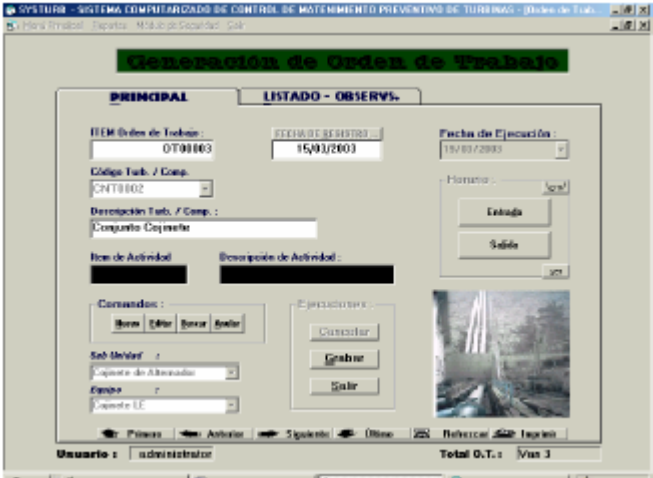

Tabla III. Operación del sistema de mantenimiento

<p>Luego de hacer un doble clic en el acceso directo al sistema, aparecerá inmediatamente una ventana de mensaje indicando que la conexión con el sistema es OK, al presionar el botón aceptar, entraremos a la ventana de control de ingreso al sistema denominada <i>Login</i>, aquí el usuario escribirá su nombre de usuario en el sistema (NICKNAME), en la caja de texto: NICKNAME y su contraseña en la caja: PASSWORD</p>	
<p>Menú de interacciones Este menú solo estará visible para los administradores del sistema; para ingresar a este menú, el usuario deberá seguir la siguiente ruta: Menú Principal (Cabeza de Menú), Menú de interacciones, clic, o directamente: Ctrl. + A, entrará a la siguiente pantalla: Desde este Menú, el usuario podrá realizar transacciones, mantenimientos y consultas cotidianas con los datos de los componentes de las turbinas, así como sus respectivas actividades. Este menú presenta las siguientes opciones:</p>	
<p>Opción Componente / Turbina Para llegar a esta opción, bastará con que el usuario utilice el <i>Shortcut</i> respectivo, o clic en el botón del mismo nombre: En esta interface el usuario podrá registrar datos (realizar mantenimientos) acerca de las características de los componentes de las turbinas, como lo son sus modelos, N° de serie, etc.; a continuación, explicaremos su correcto uso.</p>	

Continuación tabla III.

<p>Opción Actividades</p> <p>Esta es una interface de transacciones. Aquí el usuario puede generar las actividades dedicadas a los componentes de las turbinas y sus datos complementarios respectivos. Esta interfase consta de tres opciones de búsqueda: por ítem de actividad, por descripción y por fecha; y además estarán ocultas hasta presionar el botón buscar.</p>	
<p>Opción Solicitud de Servicio</p>	

Continuación tabla III.

<p>Opción orden de trabajo</p>	
<p>Generar orden de trabajo</p>	

Fuente: elaboración propia.

4.1.2. Informe de inspección

Se describe el informe de inspección del plan de mantenimiento.

Tabla IV. Informe de inspección

Mantenimiento de turbina	Entre los equipos más complejos y costosos que se utilizan en la generación de energía se encuentran las turbomáquinas, particularmente las turbinas. Su operación debe vigilarse de manera continua tanto para detectar fallas potenciales o incipientes como para programar su mantenimiento, a fin de aumentar su confiabilidad, disponibilidad y vida útil. También resulta crucial que las tareas de mantenimiento de este tipo de equipos se efectúen con rapidez para reanudar lo antes posibles la generación de energía.
Trabajos de lubricación	Las partes móviles de una turbina son muchas y, por eso, algunas necesitan lubricación para disminuir su desgaste, entre ellas están las toberas y la válvula de tobera de freno son lubricados por la operación y no requieren lubricación adicional, los cojinetes articulados del varillaje de regulación y el pistón de guía del servomotor del deflector deben engrasarse una vez por mes, y los órganos de cierre si es necesario deben engrasarse trimestralmente.
Control funcional	Mensualmente, debe controlarse el funcionamiento de los sistemas de seguridad, como interruptores límites, presostatos, medición de velocidad, etc. Trimestralmente, se debe controlar el funcionamiento de los empaques por medio del caudal de aceite y de agua de fuga. Anualmente, debe controlarse el funcionamiento y el hermetismo de todas las válvulas y grifos

Continuación tabla IV.

<p>Trabajo de mantenimiento resultante del servicio</p>	<p>Para eliminar sedimentos de arena en la tubería anular se debe lavar la tubería abriendo la válvula de vaciado. La limpieza de cilindro de agua del servomotor del deflector de cuerpos extraños se realiza cerrando la alimentación de agua, retirar el tornillo de vaciado del cilindro de agua y lavar la tubería y el cilindro abriendo la válvula.</p>
<p>Control del rodete</p>	<p>Desde el momento de la puesta en servicio de un rodete debe controlarse a fisuras y desgastes en los periodos indicados a continuación:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Revisiones: cada 8000 horas de servicio hay que someter la turbina a una revisión completa. Para ello es necesario realizar los siguientes trabajos: <ul style="list-style-type: none"> ○ Control del rodete a fisuras y superficies desgastadas. Especial atención hay que dedicar a los cangilones y el pasaje cangilón-cubo de rodete. Si se encuentran fisuras no se debe continuar usando el rodete. ○ Controlar a desgaste las puntas de aguja, asientos y cuchillas de deflector de las toberas. Si se encuentran fallas cambiar la pieza con una de repuesto. ○ Controlar el llenado y el estado del aceite, de ser necesario cambiarlo o filtrarlo. Antes de poner aceite nuevo es necesario filtrarlo. Fineza 5 μm. ○ Controlar a asiento firme uniones de tornillos, pernos y seguros en toda la turbina

Fuente: elaboración propia.

4.2. Análisis de modo de falla y efectos AMFE

Se describe el modo y falla en AMFE.

4.2.1. Análisis de costo beneficio de la propuesta

A continuación, se detallará, mediante una tabla, el resumen de los costos incurridos al realizar el proceso de reacondicionamiento.

- Primera opción es la compra de un rodete nuevo. Seguidamente se detalla una tabla que resume los costos asociados a la compra de un rodete nuevo a fábrica.

Tabla V. Resumen costos compra rodete

Descripción	Costo	%
Rodete	Q2 500 320,37	84 %
Embarque	Q 472 693,47	16 %
Transporte	Q 3 663,64	0 %
TOTAL	Q2 976 677,48	100 %

Fuente: Gerencia general de la Central Eléctrica El Recreo

En este caso, el 84 % del costo de comprar un rodete nuevo a fábrica, es el rodete como tal, seguido del embarque que comprende el transporte desde la fábrica, ubicada en Europa, hasta el Puerto de Santo Tomás de Castilla y, como un costo muy bajo se encuentra el del transporte de Santo Tomás de Castilla hasta la Central.

- Segunda opción es el reacondicionamiento del rodete. A continuación, se presentan el desglosé de los costos.

Tabla VI. **Resumen de costos del reacondicionamiento**

Descripción	Costo	%
Mano de Obra	Q 619 394,43	46 %
Soldadura	Q 258 052,72	19 %
Servicios Tercerizados	Q 165 883,00	12 %
Maquinaria	Q 96 157,12	7 %
Abrasivos	Q 90 008,66	7 %
Herramienta	Q 66 341,12	5 %
EPP	Q 20 009,07	1 %
Electricidad	Q 18 163,08	1 %
GLP	Q 12 058,25	1 %
Transporte	Q 2 863,64	1 %
TOTAL	Q1 348 931,09	100 %

Fuente: Gerencia general de la Central Eléctrica El Recreo.

Se puede apreciar por medio de los datos que los costos más elevados los comparten las categorías de mano de obra y soldadura, sumando entre ambos más de un 50 % del costo de la reparación. Le siguen los servicios tercerizados que acumulan un 10 % del costo total del reacondicionamiento, lo cual se debe a que el procedimiento es muy especializado y lo deben realizar personas capacitadas para tales tareas. Las demás categorías no representan un costo tan elevado, pero siguen siendo importantes en el procedimiento.

4.2.2. Mantenimiento RCM

Para la realización del mantenimiento se debe utilizar la hoja de decisión RCM para el análisis de fallas.

Figura 9. **Formato de hoja de información de RCM para el análisis de modos y efectos de fallas AMEF**

Hoja de trabajo AMEF	Área						
	Equipo						
Función			Falla principal		Modo de falla		Efecto/falla
1			A		1		
2			B		2		
3			C		3		
4			D		4		
5			E		5		

Fuente: elaboración propia.

Figura 10. **Hoja de decisión RCM**

Hoja de decisión RCM										Área		
Referencia de información			Evaluación de la consecuencias				H1	H2	H3	Equipo		
							S1	S2	S3			
F	FF	FM	H	S	E	O	O1	O2	O3	Intervalo inicial, año, mes o día		
							N1	N2	N3			

Fuente: elaboración propia.

4.2.3. Actualización del personal contratado

Cada tres meses se debe verificar las planillas contratadas para establecer el desempeño de cada trabajador en función de las tareas asignadas.

4.2.4. Análisis costo-beneficio de la propuesta de implementación de un sistema de gestión de mantenimiento preventivo basado en RCM

El análisis financiero del costo de la implementación de la central de monitoreo se basa en una inversión inicial de Q 120 000,00.

Tabla VII. Flujo de caja

Año	0	1	2	3	4	5
Inversión	Q1 348931,09					
Ingresos por ventas		4 000 000	4 000 000	4 000 000	4 000 000	4 000 000
Utilidad Bruta		4 000 000	4 000 000	4 000 000	4 000 000	4 000 000
Impuesto a las ganancias (35 %)		11 428,60	11 428,60	11 428,60	11 428,60	11 428,60
Utilidad Neta		3 998 571,4	3 998 571,4	3 998 571,4	3 998 571,4	3 998 571,4
Flujo de Caja	Q1 348931,09	3 998 571,4	3 998 571,4	3 998 571,4	3 998 571,4	3 998 571,4

Fuente: elaboración propia

Tabla VIII. **Valor presente neto**

VAN con tasa 15 %:	Q 12 054 897,93
--------------------	-----------------

Fuente: elaboración propia

VAN: 272,523

Tabla IX. **Tasa interna de retorno**

Acumulado,	Q1 348931,09	3 998 571,4	3 998 571,4	3 998 571,4	3 998 571,4	3 998 571,4
VAN con tasa 25 %:	Q 9 404 306,06					

Fuente: elaboración propia

CONCLUSIONES

1. Utilizando la metodología del RCM y el diagrama de Pareto, se determinó la causa asignable de la falla de los equipos, permitiendo determinar su tiempo de inoperatividad y los costos que surgen de los mismos. La metodología RCM, se apoya en sus herramientas, tales como el Árbol de fallas, Análisis de falla y efectos AMFE, Hoja de información preventiva e intervalos de tiempos de programación para el análisis de las máquinas.
2. El análisis costo-beneficio se estima que con la aplicación del Sistema de Gestión de Mantenimiento Preventivo basado en RCM, se reducirá la frecuencia de fallas, reduciendo costos de manteniendo correctivo que se realiza actualmente en la empresa.
3. Un programa de RCM garantiza las funciones principales asociadas al activo en su actual contexto operacional, determinar qué debe hacerse si no se encuentra una tarea proactiva adecuada, así como qué puede hacerse para prevenir o para predecir las fallas.

RECOMENDACIONES

1. A la Central Hidroeléctrica acudir al procedimiento del reacondicionamiento de los rodets de sus turbinas hidráulicas antes de comprar un rodete nuevo a fábrica, ya que optando por este procedimiento de mantenimiento correctivo se ahorrarán más de un millón y medio de quetzales.
2. A los operarios, al realizar el proceso de mantenimiento, utilizar el equipo de protección personal adecuado para que su integridad física no se vea afectada, ya que son tareas muy riesgosas que requieren de tomar consideraciones especiales.
3. Al jefe de mantenimiento, consultar los manuales de mantenimiento de los equipos proporcionados por el fabricante, así como supervisar el procedimiento realizado por los operarios para asegurarse de que se realice conforme las especificaciones del fabricante.

BIBLIOGRAFÍA

1. GARCÍA, Oliverio. *Gestión Moderna del Mantenimiento Industrial*. Colombia: Ediciones de la U, 2012.190 p.
2. GONZÁLEZ FERNÁNDEZ, Francisco. *Mantenimiento industrial avanzado*. Madrid: FC Editorial, 2011.184 p.
3. GUPTA, Praveen, y ARVIN Sri. *Seis Sigma sin Estadística: Enfoque en la búsqueda de las mejoras inmediatas*. España. Accelper Consulting, 2015. 176 p.
4. MOUBRAY, John. *Reliability-Centred Maintenance*. Estados Unidos Reed Elsevier Group. 1999. 134 p.
5. MOUBRAY, John. *Mantenimiento centrado en la confiabilidad (edición en español)*. Reino Unido: Aldon Ltd, 2004. 140 p.
6. PARRA MÁRQUEZ, Carlos Alberto, y CRESPO MÁRQUEZ Adolfo. *Ingeniería de Mantenimiento y Fiabilidad Aplicada a la Gestión de Activos*. Sevilla, España: INGEMAN, 2011. 140 p.

