



DEPARTAMENTO DE POSGRADOS
Maestría en Gestión de Mantenimiento

“Gestión de mantenimiento para centrales hidroeléctricas: el caso de la Central Hidroeléctrica Minas – San Francisco de la Corporación Eléctrica del Ecuador CELEC EP – Unidad de Negocio Enerjubones”

Tesis previa a la obtención del título de:
MAGISTER EN GESTIÓN DE MANTENIMIENTO

Autor:

Daniel Marcelo Ponce Orellana

Director:

Freddy Pesantez Palomeque

Cuenca – Ecuador

2016

DEDICATORIA

Quiero dedicar este trabajo a Dios por su bendición y permitirme completar esta etapa tan importante de mi formación profesional.

A mi mejor amiga, mi esposa Karina quien a pesar de la diferencia de vocaciones compartió conmigo las largas noches de estudio y con sus sabios consejos siempre me alentó a seguir adelante y no caer en el intento.

A mis hijos Julián y Valentina, quienes a pesar de su corta edad supieron comprender y compartir el tiempo que a ellos les correspondía mientras yo me preparaba en las aulas.

A mis padres por su ejemplo de lucha y sacrificio y quienes han sabido formarme con buenos hábitos y valores y porque siempre me tuvieron presente en sus oraciones.

A mis hermanas que a pesar de la distancia de una u otra forma aparecieron en el momento preciso con sus palabras de aliento y me animaron a seguir adelante.

AGRADECIMIENTO

Agradezco en primer lugar a Dios por ser mi guía y darme la fortaleza y sabiduría para afrontar el difícil trayecto que implica llegar a esta etapa de mi vida.

A la Universidad del Azuay por el esfuerzo realizado para sacar adelante esta maestría y darnos la oportunidad de alcanzar este título.

A CELEC EP Unidad de Negocio ENERJUBONES, empresa a la cual tengo el orgullo de pertenecer por darme la oportunidad de desarrollar mi trabajo de tesis aplicada a la Central Hidroeléctrica Minas San Francisco.

A mi amigo y director de tesis Ing. Freddy Pesantez, por apoyarme y guiarme desinteresadamente para la consecución de este título.

RESUMEN

Este estudio presenta en primer lugar un análisis de la situación actual del mantenimiento de las principales centrales de generación hidroeléctrica que se encuentran en operación en el país con el objeto de recoger las mejores prácticas ya implementadas y replicarlas en el modelo de gestión de la Central Hidroeléctrica Minas San Francisco.

Luego se estudian las distintas etapas a seguir para la implementación de un modelo de gestión de mantenimiento y se aplican a las condiciones actuales de la central.

Para el diseño del modelo de gestión, en primer lugar se dividió a la central por zonas en las cuales se encuentran instalados los equipos principales. Posteriormente se realizó un análisis de criticidad para cada una de estas zonas para luego determinar la o las estrategias aplicables en cada una de ellas. Una vez determinados los equipos críticos, se estudia las principales características del mantenimiento basado en condición (MBC), el mantenimiento productivo total (TPM) y el mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM) y se definen las actividades a realizar por zonas y tomando en cuenta las características técnicas y el papel que cumplen los equipos dentro de la planta.

Se plantea también una herramienta que permita evaluar permanentemente la eficiencia y eficacia del modelo propuesto y se definen los indicadores para medir la efectividad de la gestión de mantenimiento.

Finalmente se muestra el proceso a seguir para gestionar adecuadamente el stock de materiales y repuestos necesarios para mantenimiento, y se propone una estructura organizacional del talento humano para llevar a cabo el modelo de gestión planteado.

Palabras clave: *Central Hidroeléctrica, Gestión de mantenimiento, MBC, TPM, RCM, eficiencia, eficacia, efectividad*

ABSTRACT

This study starts with an analysis of the maintenance current situation of the main hydroelectric generation plants that are in operation in the country, in order to collect the best practices already implemented and replicated in the *Minas San Francisco* Hydroelectric Plant management model. Then, the different stages to follow for the implementation of a maintenance management model are studied and applied to the current plant conditions. For the design of the management model, first the hydroelectric plan was divided by areas where the main equipment is installed. Subsequently, a criticality analysis for each of these areas was performed so as to determine the applicable strategy or strategies for each one. Once the critical equipment is determined, the main Condition-Based Maintenance (CBM), Total Productive Maintenance (TPM) and Reliability-Centered Maintenance (RCM) features are studied. Then, the activities to be performed by areas are defined taking into account the technical characteristics and the role of the equipment inside the plant. A tool to continuously assess the efficiency and effectiveness of the proposed model is presented; and the indicators to measure the effectiveness of maintenance management are also defined. Finally, the process to follow in order to properly manage the stock of materials and spare parts needed for maintenance is shown; then, an organization chart of human talent responsible to carry out the management model is proposed.

Keywords: Hydroelectric Plant, Maintenance Management, CBM, TPM, RCM, Efficiency, Efficacy, Effectiveness.




Translated by,
Lic. Lourdes Crespo

Contenido

INTRODUCCIÓN	9
CAPÍTULO 1	11
DIAGNÓSTICO DE LA GESTIÓN DE MANTENIMIENTO EN LAS PRINCIPALES CENTRALES DE GENERACIÓN	11
1.1. Diagnóstico de la gestión de mantenimiento de las centrales hidroeléctricas.	12
1.2. Metodología para la investigación	13
1.3. Resultado de la investigación.....	14
1.4. Análisis del diagnóstico (FO.FA.DO.DA).....	16
CAPITULO 2	20
MODELO DE GESTIÓN DE MANTENIMIENTO	20
2.1. Descripción de las etapas de un modelo de gestión de mantenimiento	20
2.2. Diseño de la gestión de mantenimiento.....	21
2.2.1. Descripción de la Central Minas – San Francisco	21
2.2.2. Sectorización de la Central Hidroeléctrica Minas – San Francisco.....	22
2.2.3. Situación actual. Definición de objetivos, estrategias y responsabilidades de mantenimiento.....	23
2.2.4. Jerarquización de los equipos.....	23
2.2.5. Diseño del modelo de mantenimiento y recursos necesarios.....	29
2.2.6. Selección del modelo de mantenimiento.....	30
2.2.7. Análisis de los equipos críticos	35
CAPITULO 3	43
EVALUACIÓN DEL MANTENIMIENTO E INDICADORES DE GESTIÓN	43
3.1. Evaluación de la gestión del mantenimiento.....	43
3.2. Indicadores de la gestión de mantenimiento	46
3.3. Selección de indicadores	46
3.3.1. Objetivo de la gestión de mantenimiento	46
3.3.2. Parámetros a controlar	46
CAPITULO 4	49
GESTIÓN DE REPUESTOS E INVENTARIOS	49
4.1. Selección de los repuestos.....	49
4.2. Fijación de stocks.....	50
4.3. Gestión de stock.....	50
CAPITULO 5	52

GESTIÓN DEL TALENTO HUMANO DEL MANTENIMIENTO.....	52
5.1. Factores que determinan el organigrama de mantenimiento.....	52
5.1.1. Tamaño de la empresa.....	52
5.1.2. Estrategias de mantenimiento.....	52
5.2. Organigrama de mantenimiento.	53
CONCLUSIONES.....	55
Bibliografía	56
ANEXO 1	57

Índice de tablas

Tabla 1. Resumen del diagnóstico del mantenimiento	14
Tabla 2: Resumen de análisis del manejo de la información de los equipos	15
Tabla 3: Resumen de análisis de los antecedentes de los costos de mantenimiento	15
Tabla 4: Definición de asuntos críticos	17
Tabla 5: Definición de estrategias de valor (FO.FA.DO.DA)	18
Tabla 6: Características técnicas principales de la central.....	22
Tabla 7: Análisis de criticidad de la presa.....	26
Tabla 8: Análisis de criticidad del sistema de conducción.....	27
Tabla 9: Análisis de criticidad de los equipos de la casa de máquinas.....	28
Tabla 10: Resultado del Análisis de Criticidad.....	29
Tabla 11: Características técnicas del desagüe de fondo	36
Tabla 12: Características técnicas del vertedero de excesos	36
Tabla 13: Características técnicas de la obra de toma.....	37
Tabla 14: Características técnicas de las unidades de generación.....	39
Tabla 15: Áreas de actuación para la evaluación de mantenimiento	43
Tabla 16: Aspectos de evaluación	44
Tabla 17: Matriz de evaluación de mantenimiento	45
Tabla 18: Indicadores clave técnicos.....	47
Tabla 19: Indicadores clave económicos.....	47
Tabla 20: Indicadores clave organizacionales	48

Índice de figuras

Figura 1: Conformación de unidades de negocio de CELEC –EP	11
Figura 2: Estructura del proceso de auditoría de mantenimiento.....	12
Figura 3: Ciclo de trabajo de Mantenimiento	20
Figura 4: Esquema de la Central Hidroeléctrica Minas – San Francisco	23
Figura 5: Matriz de decisión de modelo de mantenimiento	31
Figura 6: Principales estrategias de mantenimiento.....	32
Figura 7: Pilares fundamentales del TPM.....	33
Figura 8: Metodología 5s	33
Figura 9: Presa de la Central Minas San Francisco	35
Figura 10: Sección del túnel de conducción	37
Figura 11: Sistema de drenaje del túnel de conducción	38
Figura 12: Casa de Máquinas Central Minas San Francisco	39

Figura 13: Modelo de Gestión de Mantenimiento de la Central Hidroeléctrica Minas – San Francisco.....	42
Figura 14: Matriz para determinar el stock de materiales y repuestos.....	51
Figura 15: Esquema organizacional para la gestión de mantenimiento.....	52
Figura 16: Organigrama funcional para la gestión de mantenimiento.....	54

Índice de gráficos

Gráfico 1: Diagnóstico de mantenimiento de la Corporación Eléctrica del Ecuador CELEC-EP.....	14
Gráfico 2: Resultado del análisis del manejo de la información de los equipos.....	15
Gráfico 3: Resultado del análisis de los antecedentes de los costos de mantenimiento.....	16
Gráfico 4: Presentación de resultados de la evaluación.....	45

Daniel Marcelo Ponce Orellana

Trabajo de graduación

Freddy Santiago Pesantez Palomeque

Julio, 2016

**Gestión de mantenimiento para centrales hidroeléctricas: el caso de la Central
Hidroeléctrica Minas – San Francisco de la Corporación Eléctrica del Ecuador CELEC EP
– Unidad de Negocio Enerjubones**

INTRODUCCIÓN

La historia del mantenimiento sufrió una revolución desde los años 80 cuando se empezaron a sustituir las revisiones periódicas con controles de vibraciones, análisis de aceite, pruebas no destructivas etc. por mantenimientos por diagnósticos, condicionales y mantenimientos predictivos.

Por otra parte a finales del siglo XX aparecen nuevas técnicas de mantenimiento, normalmente llamadas nanotecnologías y es así como comienza a afianzarse la filosofía de mantenimiento basado en el costo de ciclo de vida (Life Cycle Cost – LCC) que analiza los costos de adquisición, puesta en servicio, producción, mantenimiento, desmontaje y retiro o reemplazo. En la misma época apareció otro método conocido como mantenimiento productivo total (Total Productive Maintenance – TPM) considerado como un método organizativo, porque combina el máximo rendimiento de todas las instalaciones de las plantas con un máximo aprovechamiento del recurso humano. (Fernandez, 2004)

Todas las iniciativas anteriormente mencionadas se han desarrollado e implantado de forma excesivamente aislada y con visión poco integradora en la mayoría de las empresas.

Todos los tipos de mantenimiento conocidos presentan e inconveniente de que no son todos aplicables a todos los equipos de las plantas, cada equipo necesita una mezcla de cada uno de estos tipos. Es aquí donde surge la pregunta ¿Cuál es el mantenimiento que se debe aplicar a cada uno de los equipos de una planta?

Para contestar esta pregunta es importante tener claro el concepto de modelo de mantenimiento. Un modelo de mantenimiento es una mezcla de varios tipos de mantenimiento en proporciones determinadas y que respondan adecuadamente a las necesidades de un equipo específico. (Garrido, 2003)

Algunos estudios demuestran que es posible combinar varias técnicas de mantenimiento, tal es el caso de una empresa automotriz en la que se pensó que el TPM no prestaba la consideración debida a otras metodologías, el director de mantenimiento de la planta confirmó que aunque el TPM es herramienta eficaz era muy frecuente que no se considerasen otros medios y necesidades de mantenimiento y decidieron esforzarse por combinar lo mejor de TPM y el RCM para que el personal de mantenimiento y producción pudieran ofrecer procesos más efectivos. La combinación de estos métodos facilitó el trabajo en equipo entre las funciones de mantenimiento y producción, aumentando la confiabilidad, tiempos de producción y reduciendo los costos de explotación (Ron Moore, 1999)

Otro estudio que demuestra la viabilidad del tema de investigación propuesto, presenta un modelo llamado PFD para el diseño de programas de mantenimiento preventivo basado en las

metodologías de RCM y QFD. Este método busca mejorar la capacidad de RCM mediante la adición de las ventajas de QFD (Azadeh Kianfar, 2010)

En base a la norma ISO 9001-2008, para implementar un modelo de gestión de mantenimiento se puede establecer diagramas conocidos como ciclos de mantenimiento. El ciclo de mantenimiento habitual que explica la secuencia lógica del proceso de mantenimiento y el ciclo de mejoramiento continuo que busca oportunidades de mejora, son muy necesarios y representativos para un buen modelo de gestión de mantenimiento (Pablo Viveros, 2013)

La Unidad de Negocio ENERJUBONES se encuentra a cargo de la construcción del proyecto hidroeléctrico Minas San Francisco, el cual tiene como objetivo aportar con 275 MW de potencia instalada y aproximadamente 1.300 GWh por año de energía limpia al incorporarse al Sistema Nacional Interconectado en el año 2016, dando cumplimiento al Plan Maestro de Electrificación del Ecuador elaborado por el CONELEC. La necesidad de plantear un nuevo modelo de gestión de mantenimiento para la Central Hidroeléctrica Minas – San Francisco surge de una serie de aspectos reales necesarios para convertir modelos teóricos en un modelo real de gestión de mantenimiento alineados con el objetivo principal de la corporación que es Mantener altos índices de disponibilidad y confiabilidad de los activos de la central para conseguir un Sistema Eléctrico Nacional eficiente bajo estándares de calidad, eficiencia, eficacia y responsabilidad social.

Una investigación indica que es posible determinar un modelo de gestión de mantenimiento aun cuando el proyecto está en la fase de diseño haciendo un análisis de ciclo de vida y es posible utilizar técnicas cualitativas basadas en opiniones de especialistas con el fin de garantizar adecuados niveles de efectividad en las operaciones de mantenimiento (Pablo Viveros, 2013)

Según Amendola (2010) existe una metodología de Gerencia de Proyectos de inversión de Capital, en la cual se dan acciones y lineamientos de confiabilidad a ser tomados en cuenta durante la etapa de diseño y construcción de los proyectos. Una de las varias acciones planteadas por el autor es generar directrices de mantenimiento preliminares apoyándose en experiencias de otras plantas.

CAPÍTULO 1.

DIAGNÓSTICO DE LA GESTIÓN DE MANTENIMIENTO EN LAS PRINCIPALES CENTRALES DE GENERACIÓN.

El propósito de este capítulo es recoger las experiencias del personal encargado de llevar a cabo la gestión de mantenimiento en las principales centrales de generación hidroeléctrica que se encuentran en operación y que por sus características técnicas, condiciones de operación y capacidad de generación se asemejan a la Central Minas – San Francisco.

Los resultados obtenidos permitirán determinar un diagnóstico del estado actual de la gestión de mantenimiento en las centrales de generación, los cuales servirán como base para establecer un modelo de gestión de mantenimiento para la Central Minas – San Francisco.

El universo para la investigación y desarrollo del diagnóstico de mantenimiento ha sido determinado en base a la conformación de las unidades de negocio de la Corporación Eléctrica del Ecuador tal como se muestra en el figura 1.

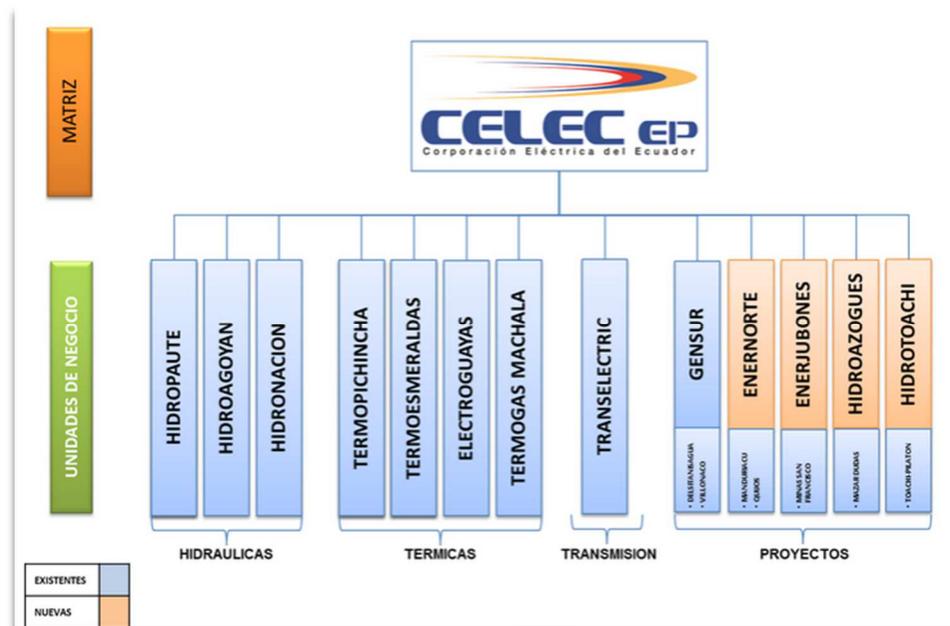


Figura 1: Conformación de unidades de negocio de CELEC –EP

Fuente: website CELEC EP www.celec.gob.ec

Como se puede observar CELEC – EP clasifica a las unidades de negocio en tres grandes grupos como son hidráulicas, térmicas y transmisión. Considerando que la central Minas – San Francisco es una central hidráulica, la recolección de la información se realizó en las unidades de negocio Hidropaute, Hidroagoyán e Hidronación, a continuación se presenta una breve descripción de cada una de ellas.

Unidad de Negocio Hidropaute.

La Unidad de Negocio HIDROPAUTE está a cargo de la operación y mantenimiento de las Centrales Hidroeléctricas Paute Mazar y Paute Molino de 170 y 1075 MW de capacidad respectivamente, además de la construcción de proyecto hidroeléctrico Paute Sopladora de 487 MW de capacidad formando así el complejo hidroeléctrico Paute Integral ubicado entre las provincias del Azuay, Cañar y Morona Santiago.

Unidad de Negocio Hidroagoyán.

HIDROAGOYAN es una de las Unidades de Negocio de CELEC E.P. ubicada en el cantón Baños de la Provincia de Tunguragua que se encarga de la administración de la producción de las centrales Agoyán (156MW), Pucará (80MW), y San Francisco (230MW).

Unidad de Negocio Hidronación

Hidronación es la unidad de negocio encargada de la generación de energía eléctrica a través de las Central Marcel Laniado de Wind mejor conocida como Daule Peripa con una capacidad instalada de 213 MW. Esta unidad de negocio está a cargo también de la operación y mantenimiento de la Central Hidroeléctrica Baba que cuenta con una potencia instalada de 42MW.

1.1. Diagnóstico de la gestión de mantenimiento de las centrales hidroeléctricas.
A través del diagnóstico se generará una visión de la estructura, relaciones, procedimientos y personal relativo a una buena práctica del mantenimiento. Además proporcionará información sobre los sistemas implementados para determinar si operan efectiva y eficientemente; en consecuencia se podrá avizorar la situación actual.

El modelo planteado para establecer el diagnóstico de la gestión de mantenimiento en las centrales hidroeléctricas considera cinco aspectos para cubrir todos los campos que una buena gestión de mantenimiento debería tener en cuenta.

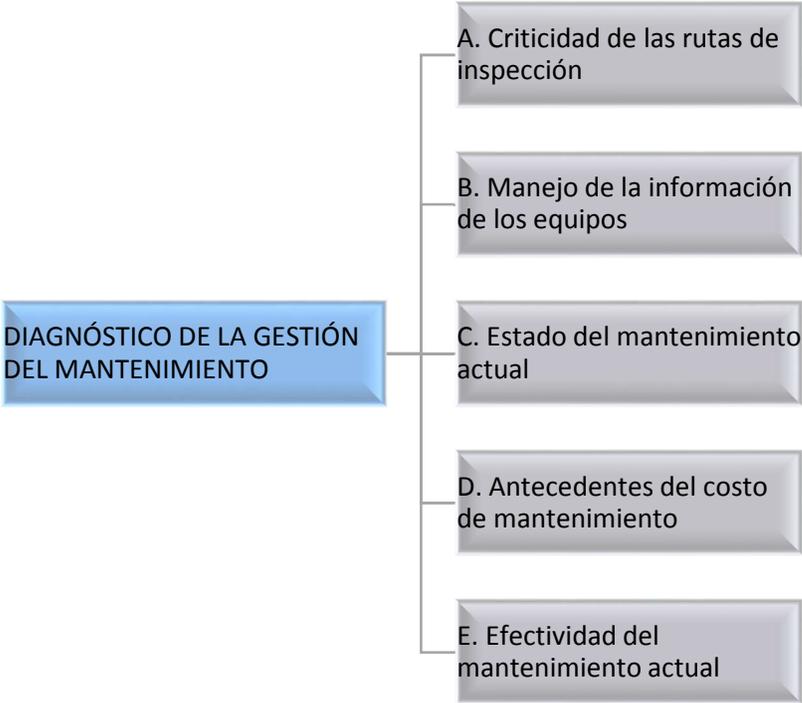


Figura 2: Estructura del proceso de auditoría de mantenimiento
Fuente: el autor

A continuación se describe el alcance de cada uno de los campos de investigación indicados en el cuadro 2.

A. Criticidad de rutas de inspección.

Se trata de la parte global del diagnóstico y cubre aspectos como sectorización de la planta, criticidad de los equipos y la estimación de los tiempos de mantenimiento. Esto permitirá asignar las prioridades en la ejecución de las tareas de mantenimiento y en un futuro implementar políticas de mantenimiento basadas en confiabilidad.

B. Manejo de la información de los equipos.

El objeto de esta sección es evaluar el grado de conocimiento en relación a los recursos de la información y las herramientas utilizadas para la planificación del mantenimiento, por ejemplo: se recaban los antecedentes sobre la información de los equipos como catálogos, fichas de inventarios etc. Se recogen también datos importantes como son tasas de fallas, tiempo de abastecimiento, distribución de personal y recursos entre otros.

C. Estado actual del mantenimiento

Este aspecto busca evaluar cómo se está llevando a cabo el mantenimiento, tomando en cuenta detalles como existencias de rutinas básicas de mantenimiento, relación de horas de mantenimiento, tipo de estrategia utilizada etc.

D. Información del costo de mantenimiento.

Esta información sirve para evaluar si el área de mantenimiento tiene conocimiento o está involucrada en la toma de decisiones de aspectos tales como reemplazo de equipos, reemplazo de elementos fallados o grupos de elementos, mantenimiento propio o tercerización y determinar el costo asociado a las políticas de mantenimiento implementadas. Se analizan los datos relacionados con costos de adquisición, tasas de depreciación, costo de mano de obra, costos alternativos, etc.

E. Efectividad del mantenimiento actual

Este punto está dirigido a identificar que tan efectivo es el manejo de los índices de control, ya que no se puede implementar un sistema de gestión si no se cuenta con un punto de referencia sobre el cual medir su efectividad.

1.2. Metodología para la investigación

Para llevar a cabo la investigación de la gestión de mantenimiento en las centrales hidroeléctricas en operación, se realizan una serie de preguntas para cada aspecto mencionado anteriormente (ver anexo 1), estas preguntas son planteadas a las personas encargadas del mantenimiento de las centrales como por ejemplo supervisores, jefes de mantenimiento o de ingeniería de mantenimiento.

Cada pregunta planteada tiene una valoración de 1 cuando el aspecto a evaluar no es favorable, 3 cuando los aspectos son regulares o rescatables y con un valor de 5 cuando la situación del mantenimiento es satisfactoria.

El valor promedio del conjunto de preguntas de cada aspecto se representa en un gráfico de una calificación descriptiva, de esta forma se puede comparar los resultados y determinar los aspectos que se puedan mejorar en la gestión de mantenimiento de la Central Minas – San Francisco.

El criterio utilizado para determinar el estado actual del mantenimiento es el siguiente:

- $1,0 \leq \text{puntaje} \leq 2,9$ Presenta deficiencias
- $3,0 \leq \text{puntaje} \leq 3,9$ Regular
- $4,0 \leq \text{puntaje} \leq 5,0$ Satisfactorio

Los resultados se presentarán en forma gráfica, en primer lugar un gráfico general con el estado actual del mantenimiento en las centrales de generación y por otra parte se presentan gráficas con los resultados de cada uno de los aspectos analizados.

Es importante aclarar que el presente estudio no pretende analizar la gestión de mantenimiento de cada una de las unidades de negocio, sino identificar los aspectos positivos y que puedan ser implementados en la gestión del mantenimiento de la Central Minas – San Francisco.

1.3. Resultado de la investigación

Las encuestas realizadas a distintos funcionarios de las centrales hidroeléctricas en operación arrojaron los resultados que se muestran a continuación:

Tabla 1. Resumen del diagnóstico del mantenimiento

Áreas Funcionales Consideradas	Valor	Calificación
Criticidad de rutas de inspección	4,00	satisfactorio
Manejo de la información de los equipos	3,60	regular
Estado del mantenimiento actual	3,90	regular
Antecedentes de costos de mantenimiento	2,70	deficiencias
Efectividad del mantenimiento actual	4,00	satisfactorio

Fuente: el autor

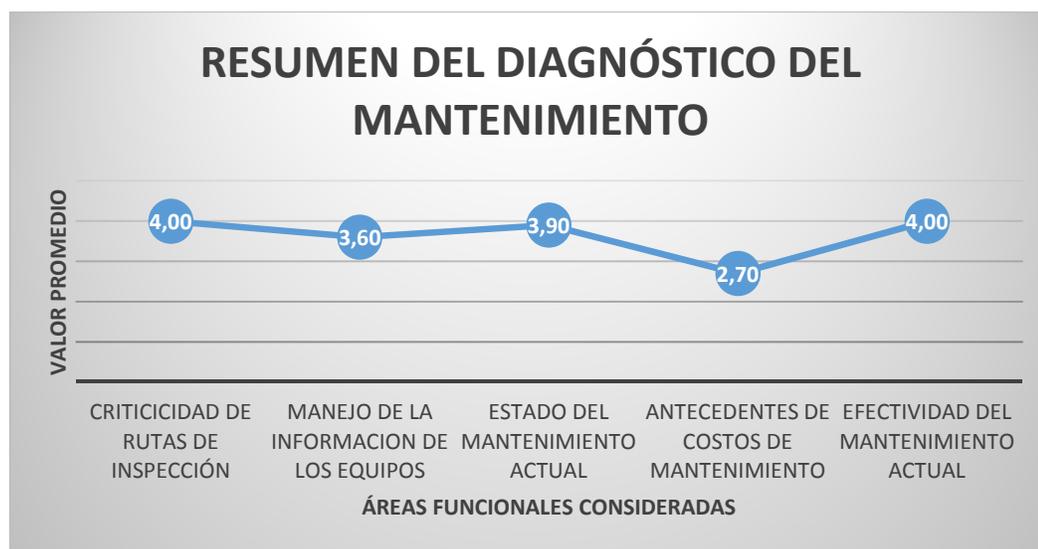


Gráfico 1: Diagnóstico de mantenimiento de la Corporación Eléctrica del Ecuador CELEC-EP
Fuente: El autor

Como se puede notar en el gráfico 1, las áreas funcionales con menor grado de satisfacción son las de manejo de información de los equipos y la de información de costos de mantenimiento con una calificación de 3,90 y 2,70 respectivamente, por tal razón, a continuación se presenta un análisis más detallado de todos los aspectos que forman parte de estas áreas funcionales con el fin de determinar las causas de estos resultados.

Para el análisis del área funcional de manejo de la información de los equipos, se agruparon las preguntas realizadas en las encuestas en cinco grandes grupos y se promediaron sus resultados los cuales se muestran a continuación

Tabla 2: Resumen de análisis del manejo de la información de los equipos

Preguntas	Aspectos a considerar	Valor	Calificación
B1,B10,B11,B12	Información de los equipos	3,30	Regular
B3,B4,B5,B6,B9	Información sobre mantenimiento	4,30	Satisfactorio
B2,B7,B8	Información sobre manejo de los recursos	3,00	Regular
B15	Información sobre indicadores	2,80	Deficiente
B13,B14	Información sobre manejo de personal	3,70	Regular

Fuente: El Autor

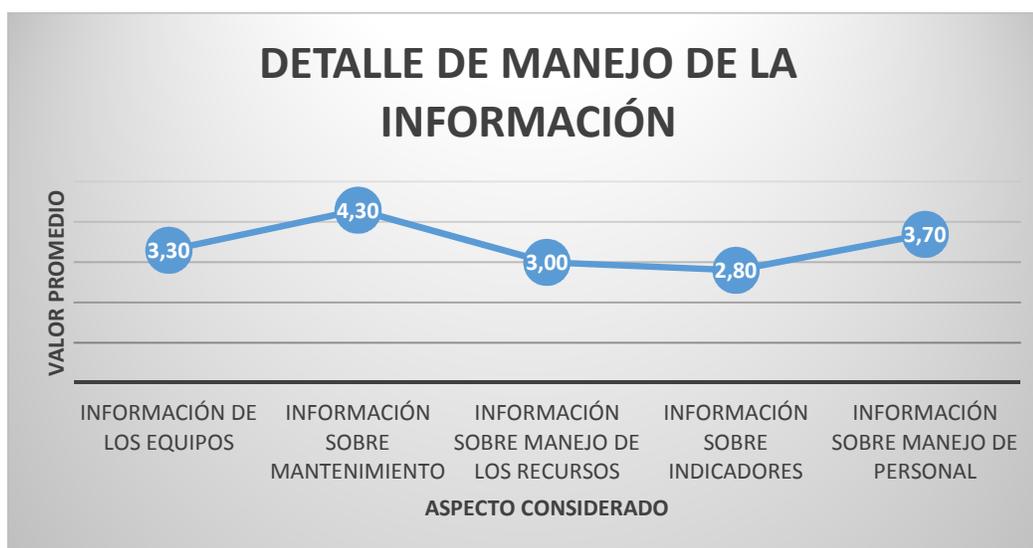


Gráfico 2: Resultado del análisis del manejo de la información de los equipos

Fuente: El Autor

Para el análisis del área de antecedentes de los costos de mantenimiento se procedió de manera similar al caso anterior con la diferencia que en esta ocasión se agruparon las preguntas en 4 aspectos principales, a continuación se muestran los resultados obtenidos.

Tabla 3: Resumen de análisis de los antecedentes de los costos de mantenimiento

Preguntas	Aspectos a considerar	Valor	Calificación
D1,D2,D3,D4	Análisis de reemplazo de los equipos	2,80	Deficiente
D6,D11	Análisis de reemplazo a la falla o grupo de elementos	2,80	Deficiente
D5,D8,D12,D13	Análisis para mantenimiento propio o tercerización	2,80	Deficiente
D7,D9.D10	Análisis de evaluación de costos	2,60	Deficiente

Fuente: El Autor



Gráfico 3: Resultado del análisis de los antecedentes de los costos de mantenimiento
Fuente: El Autor

En el gráfico 3 se puede observar que todos los aspectos de esta área funcional presentan deficiencias, esto se debe a que no existe una adecuada comunicación entre las áreas de mantenimiento y financiero.

1.4. Análisis del diagnóstico (FO.FA.DO.DA)

Luego del diagnóstico se identificaron los temas críticos los cuales son identificados como fortalezas, debilidades, oportunidades y amenazas y posteriormente se realiza un análisis de las fortalezas y debilidades versus las oportunidades y amenazas FO.FA.DO.DA (FO fortalezas vs oportunidades, FA fortalezas vs amenazas, DO debilidades vs oportunidades y DA debilidades vs amenazas) con el objeto de establecer estrategias de valor que permitan mejorar y potenciar los temas críticos para implementarlos en la Central Minas – San Francisco.

Tabla 4: Definición de asuntos críticos

TEMAS CRÍTICOS	ASUNTOS ESTRATÉGICOS
	FORTALEZAS:
Información sobre mantenimiento	1. Se cuenta con programas y procedimiento para mantenimiento de todos los equipos de las centrales. 2. Se poseen registros de mantenimientos de todos los equipos y los tiempos empleados.
Información de los equipos	Se cuenta con una clasificación de proveedores de partes, piezas y equipos y con catálogos y manuales de los equipos con los que cuenta la central.
	DEBILIDADES:
Análisis de reemplazo de equipos	1. No se cuenta con información respecto al costo de adquisición de los equipos y su tasa de depreciación. 2. No se sabe con exactitud el costo de los repuestos de cada equipo
Análisis para mantenimiento propio o tercerización	No se cuenta con un procedimiento para determinar si es más rentable subcontratar o trabajar con recursos propios.
Análisis de la evaluación de los costos	1. No se conoce la relación entre costos de mantenimiento y costos de producción. 2. No se lleva un control de gastos de mantenimiento por equipo.
	OPORTUNIDADES:
Información de los equipos	1. Un estudio de la tasa de fallos de los equipos permitirá optimizar las actividades de mantenimiento y su periodicidad de intervenciones.
Información del manejo de los recursos	Llevar un registro de disponibilidad de repuestos en bodega y un procedimiento para establecer el stock mínimo ayudará a optimizar el uso de los recursos designados a mantenimiento.
Información sobre indicadores	El uso de los indicadores adecuados permitirá mejorar permanentemente la gestión de mantenimiento
	AMENAZAS:
Información sobre indicadores	Un mal uso de los indicadores puede dar resultados erróneos de la evaluación de la gestión de mantenimiento.
Análisis para mantenimiento propio o tercerización	El abuso de la tercerización puede incrementar el costo de mantenimiento y causar malestar en el personal de mantenimiento.
Información sobre el manejo de los recursos	La falta de una política para determinar los recursos necesarios puede causar la falta o exceso de personal.

Fuente: El Autor

Tabla 5: Definición de estrategias de valor (FO.FA.DO.DA)

ESTRATEGIAS DE VALOR		
ESTRATEGIAS FO	F1O1	Optimizar los programas y procedimientos de mantenimiento con un análisis de las tasas de fallo de los equipos.
	F1O2	Enlazar la información de mantenimiento con los inventarios de repuestos disponibles en bodega y stock necesario para próximos mantenimientos.
	F1O3	Establecer un indicador que permita controlar los repuestos utilizados durante los mantenimientos.
	F2O1	Solicitar a los proveedores de equipos y repuestos las tasas de fallos de los equipos a ser suministrados
	F2O2	Verificar que los proveedores estén en capacidad de suministrar el stock necesario en el momento que se requiera.
	F2O3	Plantear indicadores que permitan controlar el cumplimiento el plan anual de contrataciones y adquisiciones.
ESTRATEGIAS FA	F1A1	Los registros de mantenimiento de los equipos deben aportar con información para la medición de la efectividad del mantenimiento.
	F1A2	Establecer políticas y procedimientos de mantenimiento para determinar la conveniencia o no de contratar el servicio de mantenimiento externo.
	F1A3	Determinar campos específicos para registrar adecuadamente los recursos empleados en mantenimientos y retroalimentar esta información para la optimización de los mismos.
	F2A1	Incluir los datos de catálogos y fabricantes tales como tasas de fallo entre otros en los indicadores de efectividad del mantenimiento.
	F2A2	Establecer políticas y procedimientos de mantenimiento para determinar si es conveniente contratar el mantenimiento y establecer una base de datos de los proveedores más eficientes.
	F2A3	Capacitar al personal encargado de mantenimiento sobre los equipos y sistemas de la planta.
ESTRATEGIAS DO	D1O1	Analizar el reemplazo de los equipos en función de la tasa de fallos de los equipos.
	D1O2	Implementar una metodología eficaz para garantizar la disponibilidad de recursos previo al reemplazo de equipos.
	D1O3	Establecer indicadores técnicos que permitan evaluar la necesidad del reemplazo de los equipos.
	D2O1	En función de la información de los equipos, establecer políticas para determinar si el mantenimiento se puede hacer con personal propio o es necesario tercerizar.
	D2O3	Implementar índices técnicos y económicos para controlar la tercerización de servicios de mantenimiento.
	D3O1	Analizar la tasa de fallos de los equipos para determinar la depreciación de los equipos.
	D3O2	Evaluar permanentemente los costos de almacenamiento de repuestos para optimizar la gestión de inventarios.
	D3O3	Implementar índices económicos para evaluar la efectividad de la gestión de mantenimiento.

ESTRATEGIAS DA	D2A2	Evaluar los costos incurridos por mantenimiento usando personal propio vs tercerización
	D2A3	Implementar políticas y procedimientos para selección de personal.
	D3A1	Implementar indicadores económicos para evaluar el adecuado uso de los recursos asignados a mantenimiento.
	D3A3	Implementar índices que permitan medir la optimización del personal de mantenimiento.

Fuente: El Autor

Las estrategias de valor planteadas en este capítulo serán consideradas más adelante para determinar las actividades de mantenimiento y establecer los índices de control más adecuados.

CAPITULO 2

MODELO DE GESTIÓN DE MANTENIMIENTO

Una gestión de mantenimiento eficaz incluye todas las actividades encaminadas a establecer prioridades y objetivos de mantenimiento, las estrategias y responsabilidades. Además debe considerar la reducción de costos globales de producción, asegurar el adecuado funcionamiento de las instalaciones y equipos, disminuir al máximo los riesgos para el personal y los efectos negativos para el medio ambiente.

Los objetivos de mantenimiento se pueden definir como metas planteadas a fin de cumplir con los objetivos estratégicos de la corporación que se cumplen a través de distintas actividades de mantenimientos relacionadas con los diferentes niveles de control, desde el estratégico hasta el nivel operativo de mantenimiento, es decir, las estrategias direccionan y definen el plan organizacional para conseguir los objetivos.

En la figura 3 se muestran dos ciclos de trabajo muy representativos y necesarios enmarcados dentro de un modelo de gestión de mantenimiento. El primero, conocido como el Ciclo Habitual de mantenimiento o ciclo de trabajo estándar en el cual se explica la secuencia lógica del proceso táctico – operativo de mantenimiento tales como: planificación, programación, asignación de tareas y ejecución. Mientras que el segundo es conocido como Ciclo de Mejoramiento Continuo, este ciclo incrementa dos nuevas actividades: análisis del trabajo ejecutado y el proceso de identificación de tareas para la implementación de mejoras (Pablo Viveros, 2013)

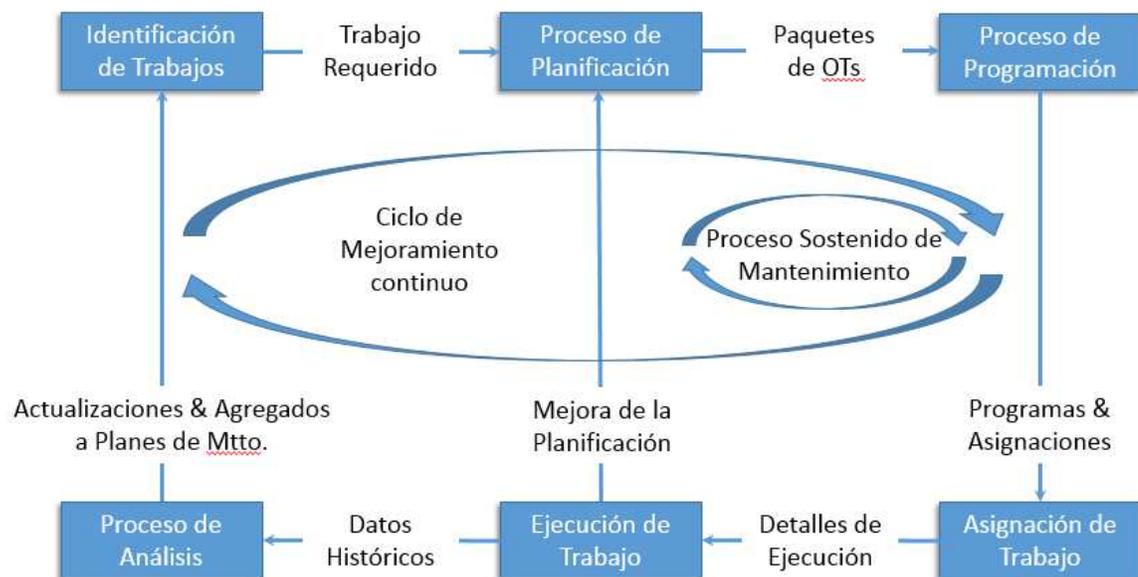


Figura 3: Ciclo de trabajo de Mantenimiento
Fuente: Revista chilena de ingeniería vol. 21 No. 21

2.1. Descripción de las etapas de un modelo de gestión de mantenimiento

De acuerdo al estudio "**Propuesta de un modelo de gestión de mantenimiento y sus principales herramientas de apoyo**" publicado por la revista chilena de ingeniería, se proponen siete etapas para la implementación de un modelo de gestión de mantenimiento en una organización que gestiona en menor o mayor medida el mantenimiento, de las cuales para el caso de la Central Hidroeléctrica Minas – San Francisco se adoptarán las que se describen a continuación

Etapa 1: Análisis de la situación actual. Definición de objetivos, estrategias y responsabilidades de mantenimiento.

Este análisis se realiza en organizaciones o plantas que disponen de métodos más o menos definidos de gestión o más aún en caso de que no se cuente con ningún método o procedimiento destinado a mantenimiento.

Una eficiente gestión de mantenimiento debe tener definidos los objetivos (metas), establecer una estrategia alineada con los objetivos estratégicos de la corporación y determinar las responsabilidades a nivel operacional y gerencial.

Etapa 2: Jerarquización de los equipos.

En esta etapa se realiza una discretización de los activos físicos basados en su criticidad, es decir su impacto en el sistema productivo global y /o seguridad del sistema.

Este análisis permite generar una estructura para la toma de decisiones acertadas y efectivas definiendo las prioridades de los sistemas o equipos según el parámetro de valor conocido como Criticidad que es proporcional al Riesgo.

Etapa 3: Diseño de modelos de mantenimiento y recursos necesarios.

El diseño de los planes de mantenimiento consiste en la programación de actividades que permita optimizar la asignación de recursos así como minimizar el impacto en la producción.

Para esto es importante conocer claramente las funciones de los equipos en su contexto operacional y cuáles serían sus posibles fallas, en caso de que sea posible se analizan las causas raíz de las fallas identificadas. Finalmente se evalúan las consecuencias de cada falla en las escalas operacional, seguridad, medio ambiente y costo.

Las estrategias y tipos de mantenimiento comúnmente utilizadas son Mantenimiento Basado de Condición (MBC), Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM), Mantenimiento Productivo Total (TPM) entre otros. En esta etapa se debe seleccionar la o las estrategias que mejor se adapten a la organización y sus activos.

Etapa 4: Evaluación y control de la ejecución del mantenimiento.

En la etapa anterior se definen las estrategias de mantenimiento y las actividades necesarias para su ejecución, en esta etapa se deben establecer los métodos de evaluación de su cumplimiento. Las desviaciones identificadas deben ser controladas para perseguir continuamente los objetivos estratégicos de la organización y los valores determinados para los índices clave de mantenimientos seleccionados.

2.2. Diseño de la gestión de mantenimiento

A continuación se presenta el desarrollo detallado de cada una de las etapas descritas en el punto anterior específicamente para obtener el modelo de gestión de mantenimiento para la Central Hidroeléctrica Minas San – Francisco.

2.2.1. Descripción de la Central Minas – San Francisco

La Central Hidroeléctrica Minas – San Francisco se encuentra en etapa de construcción y se ubica al sur del Ecuador, entre las provincias de Azuay y el Oro, aproximadamente a 500 Km de la capital del país, a 92 Km de la ciudad de Cuenca y a 30 Km de la ciudad de Machala.

Tabla 6: Características técnicas principales de la central

CAUDALES CARACTERÍSTICOS			CASA DE MÁQUINAS		
Caudal de diseño	65,00	m ³ /s	Tipo de turbinas	3	Pelton
Caudal 90%	13,64	m ³ /s	Cota del eje de turbina	281,32	msnm
Caudal medio	48,33	m ³ /s	Cota del piso de turbina	282,93	msnm
PRESA			Cota del piso de generador	287,40	msnm
Altura de la presa	54,00	m	Cota del piso principal	291,25	msnm
Nivel normal máximo de operación	792,86	msnm	RESUMEN DEL APROVECHAMIENTO		
Nivel normal mínimo de operación	783,33	msnm	Altura bruta máxima	511,40	msnm
Volumen máximo	14.351.337,00	m ³	Altura bruta mínima	502,01	msnm
Volumen mínimo	8.351.337,00	m ³	Altura bruta promedio	508,36	msnm
Volumen útil	6.000.000,00	m ³	Altura neta de diseño	474,51	msnm
TUNEL DE BAJA PRESIÓN			Eficiencia de la turbina	91,50	%
Longitud	13.896,00	m	Potencia instalada	275,61	MW
Sección	Circular		Potencia del grupo	270,91	MW
Diámetro	4,74	m	Energía producida	1.290,80	GW-h/año
TUNEL DE ALTA PRESIÓN					
Sección	Circular				
Diámetro	3,77	m			
Longitud	566,40	m			

Fuente: El Autor

2.2.2. Sectorización de la Central Hidroeléctrica Minas – San Francisco

Una central hidroeléctrica cuenta con varios equipos importantes distribuidos en diferentes sectores. Cada uno de estos equipos tiene características particulares que deben ser tomadas en cuenta al momento de determinar una o varias estrategias de mantenimiento.

Con el afán de estudiar los equipos principales de la central a continuación se presenta el análisis de cada uno de estos por zonas tal como se muestra en el siguiente diagrama:



Figura 4: Esquema de la Central Hidroeléctrica Minas – San Francisco
Fuente: El Autor

2.2.3. Situación actual. Definición de objetivos, estrategias y responsabilidades de mantenimiento.

Para determinar los objetivos de mantenimiento es importante considerar que estos no se pueden limitar a una mayor producción y optimización de presupuestos solamente, sino que se debe tener en cuenta otros factores y sobre todo los objetivos de la empresa.

Como objetivo general de mantenimiento se podría establecer que es el de **“garantizar la generación de energía eléctrica en el momento oportuno optimizando el costo integral.”**

Con el fin de cumplir el objetivo general planteado se definen acciones parciales fácilmente cuantificables o medibles, siguiendo un proceso lógico en tres períodos de tiempo, corto, mediano y largo plazo los cuales se describen a continuación.

- Objetivo a corto plazo: Reparación de averías en el menor tiempo posible a un costo mínimo y con la calidad necesaria.
- Objetivo mediano plazo: Operación regular de las instalaciones a un mínimo costo.
- Objetivo a largo plazo: Asegurar la máxima disponibilidad de las instalaciones de la Central Hidroeléctrica Minas – San Francisco alargando su vida útil optimizando los medios humanos y materiales.

2.2.4. Jerarquización de los equipos.

El proceso de jerarquización de los activos sirve para definir el número de elementos o componentes de una planta o instalación en agrupaciones secundarias que trabajan en conjunto para alcanzar objetivos establecidos (Amendola, 2010).

La metodología para la jerarquización de sistemas y equipos es conocido como análisis de criticidad. Este análisis permite determinar las áreas sobre las cuales se debe tener una mayor atención del mantenimiento en función del proceso que se realiza (García, 2013)

Desde el punto de vista matemático la criticidad se puede expresar como:

$$\text{Críticidad} = \text{Frecuencia} \times \text{Consecuencia}$$

Donde la frecuencia está ligada al número fallos o eventos que se presenta en un sistema o equipo, mientras que la consecuencia se refiere a los impactos en los costos de reparación, producción así a los impactos en la seguridad y el ambiente.

A continuación se presenta el análisis de criticidad de los sistemas de la central separados por sectores.

Este método consiste en plantear seis factores de consecuencia. A cada uno de estos factores se le asigna un valor de ponderación y que sumados dan cien puntos. Cada factor tiene a su vez criterios para su análisis y un valor de ponderación.

El cálculo de criticidad para cada equipamiento se obtiene del producto entre la probabilidad de ocurrencia de cada criterio multiplicado por los valores de ponderación del criterio y del factor. El resultado de criticidad del equipamiento, corresponde a la sumatoria de los productos parciales obtenidos en cada uno de los factores. Al final, cada equipamiento analizado, tendrá un valor entre 0 y 100 puntos los cuales se clasifican de la siguiente manera:

- Mayor o igual a 70 = Crítico
- Entre 40 y 69 = Semi – Crítico
- Menor a 40 = No crítico

A continuación se describen los factores de consecuencia planteados:

Factor de velocidad de intervención

Es el tiempo que puede transcurrir entre el momento en que se detecta una falla y el momento de actuación sobre ella. La escala de valoración es: muy corto, no da tiempo para la intervención; corto, se puede realizar una intervención; y suficiente, es posible programar la intervención.

Factor de seguridad del personal y del ambiente

Evalúa las consecuencias que la falla podría ocasionar sobre las personas y su impacto sobre el ambiente. La escala es: sin consecuencias; efecto temporal sobre las personas, no afecta el ambiente; efecto temporal sobre las personas y el ambiente; efecto irreversible sobre las personas; y efecto irreversible sobre las personas y el ambiente.

Factor de costos de indisponibilidad

Representa el costo por parada de producción en función del tiempo que se necesita para atender, ya sean reparaciones correctivas, como para mantenimientos planeados. La escala es: Disponible, equipo listo para cumplir su función; indisponible programado, equipo en mantenimiento planificado (preventivo y/o predictivo); indisponible no programado, equipo en reparaciones correctivas.

Factor de costos de reparación

Clasificación de acuerdo con Pareto: permite determinar criterios de clasificación de las fallas de acuerdo con los costos directos de reparación. La escala usada es: Alta: equipamiento que pertenece al grupo responsable por el 80% del total de los costos directos de reparación; Media: equipamiento que pertenece al grupo responsable por el 15% del total de los costos directos de reparación; Baja: equipamiento que pertenece al grupo correspondiente al 5% del total de los costos directos de reparación.

Factor de redundancia

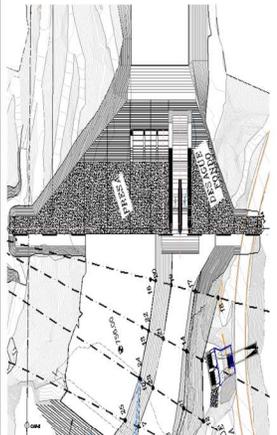
Implica la consecuencia sobre la disponibilidad de un sistema, al disponer o no, de uno o más equipamientos de respaldo. La escala es: No redundante, sin equipamiento de respaldo; y redundante, con equipamiento de respaldo.

Factor de ocurrencia de fallo

Relaciona la cantidad de fallos que un equipamiento puede presentar en el período de un año. La escala es: Alto: Mayor a 2 fallas al año; Medio: Entre 1 y 2 fallas al año; Bajo: cero fallas al año.

En base a lo indicado la nueva plantilla para análisis de criticidad quedaría estructurada de la siguiente manera.

Tabla 7: Análisis de criticidad de la presa

Análisis de la criticidad de los equipamientos																														
ZONA	1																													
NOMBRE	PRESA																													
																														
			<p>FACTOR DE CONSECUENCIA</p> <table border="1"> <tr><td>Factor de velocidad de intervención</td><td>POND.</td></tr> <tr><td>Factor de seguridad del personal y ambiente</td><td>15</td></tr> <tr><td>Factor de costos de indisponibilidad</td><td>10</td></tr> <tr><td>Factor de costos de reparación</td><td>25</td></tr> <tr><td>Factor de redundancia</td><td>20</td></tr> <tr><td>Factor de ocurrencia</td><td>10</td></tr> <tr><td>Factor de ocurrencia</td><td>20</td></tr> <tr><td colspan="2">SUMATORIA</td></tr> <tr><td colspan="2">100</td></tr> </table>										Factor de velocidad de intervención	POND.	Factor de seguridad del personal y ambiente	15	Factor de costos de indisponibilidad	10	Factor de costos de reparación	25	Factor de redundancia	20	Factor de ocurrencia	10	Factor de ocurrencia	20	SUMATORIA		100	
Factor de velocidad de intervención	POND.																													
Factor de seguridad del personal y ambiente	15																													
Factor de costos de indisponibilidad	10																													
Factor de costos de reparación	25																													
Factor de redundancia	20																													
Factor de ocurrencia	10																													
Factor de ocurrencia	20																													
SUMATORIA																														
100																														
FACTOR	Factor de velocidad de intervención PF			Factor de seguridad del personal y ambiente				Factor de costos de Indisponibilidad			Factor de costos de reparación			Factor de redundancia			Factor de ocurrencia de fallo													
	Muy corto, no da tiempo para la intervención [1]	Corto, se puede realizar una intervención [0,5]	Suficiente, es posible programar la intervención [0,2]	Sin consecuencias [0]	Efecto temporal sobre personas, no afecta el ambiente [0,3]	Efecto temporal sobre las personas y ambiente [0,6]	Efecto Irreversible sobre las personas [0,8]	Efecto Irreversible sobre las personas y ambiente [1]	Disponible [0]	Indisponible programado [0,7]	Indisponible no programado [1]	Clasificación A mayor a 100000 USD [1]	Clasificación M entre 10000 y 100000 USD [0,4]	Clasificación B menos de 10000 USD [0,1]	Sin redundancia [1]	Con redundancia [0]	Mayor a 2 Fallos al año [1]	Entre 1 y 2 Fallos al año [0,5]	0 Fallos al año [0]											
Compuerta radial del ventedero			1																											
Sistema hidráulico de la compuerta radial																														
Stop log		1			1																									
Fórtico de izaje del stop log			1																											
Compuerta radial del desagüe de fondo		1																												
Sistema hidráulico de la compuerta radial																														
Compuerta plana de mantenimiento tipo buerau		1																												
Sistema hidráulico de la compuerta tipo buerau		1																												
Compuerta plana		1																												
Sistema hidráulico de la compuerta plana																														
Rejillas de la obra de toma		1																												
Máquina limpiadora de rejillas			1																											
Compuerta plana de emergencia		1																												
Sistema hidráulico de la compuerta plana de emergencia																														
Sop log			1																											
Fórtico de izaje del stop log																														

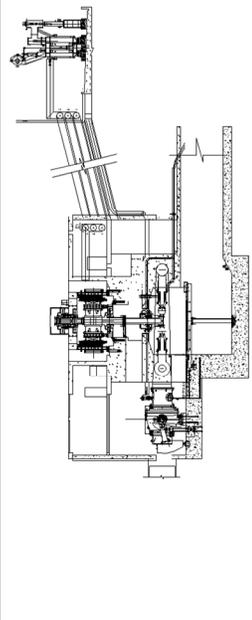
Fuente: El Autor

Tabla 8: Análisis de criticidad del sistema de conducción

Análisis de la criticidad de los equipamientos															
ZONA		2													
NOMBRE		CONDUCCION													
DIAGRAMA		<p> PRESA SAN JUANICO TUNEL DE CONDUCCION CAMARA DE EQUILIBRIO CAMARA DE PRESION CAMARA DE MANOMETROS TUBERIA DE PRESION HORIZONTAL LE10 m Longitud = 3770m Long. Nivel de conducción = 1266m No. Hitos Long. = 25m e = 400 mm No. Batajes Long. = 3m e = 3770m </p>													
FACTOR DE CONSECUENCIA		POND.													
Factor de velocidad de intervención		15													
Factor de seguridad del personal y ambiente		10													
Factor de costos de indisponibilidad		25													
Factor de costos de reparación		20													
Factor de redundancia		10													
Factor de ocurrencia		20													
SUMATORIA		100													
FACTOR	Factor de seguridad del personal y ambiente	Factor de seguridad del personal y ambiente				Factor de velocidad de intervención PF	Factor de ocurrencia de fallo			Factor de redundancia	Factor de ocurrencia de fallo				
		Indisponible programado [0,7]	Indisponible no programado [1]	Factor de costos de reparación	Factor de costos de redundancia		Factor de redundancia [1]	Factor de redundancia [0]	Mayor a 2 Fallos al año [1]		Entre 1 y 2 Fallos al año [0,5]	0 Fallos al año [0]			
EQUIPO / SISTEMA	Sin consecuencias [0]	Efecto temporal sobre las personas, no afecta el ambiente [0,3]	Efecto temporal sobre las personas y ambiente [0,6]	Efecto irreversible sobre las personas [0,8]	Efecto irreversible sobre las personas y ambiente [1]	Factor de velocidad de intervención PF	Factor de ocurrencia de fallo	Factor de redundancia	Factor de redundancia	Factor de redundancia	Factor de redundancia	Factor de redundancia	Factor de redundancia	Factor de redundancia	Factor de redundancia
Túnel de baja presión	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Sistema de drenaje	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Válvula mariposa de cabeceera	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Unidad hidráulica de la válvula	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Tubería de presión	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Fuente: El Autor

Tabla 9: Análisis de criticidad de los equipos de la casa de máquinas

Análisis de la criticidad de los equipamientos																																									
ZONA		3		DIAGRAMA																																					
NOMBRE		CASA DE MÁQUINAS																																							
FACTOR DE CONSECUENCIA		POND.																																							
Factor de velocidad de intervención		15																																							
Factor de seguridad del personal y ambiente		10																																							
Factor de costos de indisponibilidad		25																																							
Factor de costos de reparación		20																																							
Factor de redundancia		10																																							
Factor de ocurrencia		20																																							
SUMATORIA		100																																							
FACTOR		↑																																							
EQUIPO / SISTEMA		→																																							
Válvula esférica		1		Muy corto, no da tiempo para la intervención [1]		Corto, se puede realizar una intervención [0,5]		Suficiente, es posible programar la intervención [0,2]		Sin consecuencias [0]		Efecto temporal sobre las personas, no afecta el ambiente [0,3]		Efecto temporal sobre las personas y ambiente [0,6]		Efecto irreversible sobre las personas [0,8]		Efecto irreversible sobre las personas y ambiente [1]		Disponible [0]		Indisponible programado [0,7]		Indisponible no programado [1]		Clasificación A mayor a 10000 USD [1]		Clasificación M entre 1000 y 10000 USD [0,4]		Clasificación B menos de 1000 USD [0,1]		Sin redundancia [1]		Con redundancia [0]		Mayor a 2 Fallas al año [1]		Entre 1 y 2 Fallas al año [0,5]		0 Fallas al año [0]	
Turbina		1		1		1		1		1		1		1		1		1		1		1		1		1		1		1		1		1		1		1			
Regulador de velocidad		1		1		1		1		1		1		1		1		1		1		1		1		1		1		1		1		1		1					
Generador		1		1		1		1		1		1		1		1		1		1		1		1		1		1		1		1		1		1					
Transformador		1		1		1		1		1		1		1		1		1		1		1		1		1		1		1		1		1		1					
Sistemas auxiliares de la unidad		1		1		1		1		1		1		1		1		1		1		1		1		1		1		1		1		1		1					
Sistemas auxiliares generales		1		1		1		1		1		1		1		1		1		1		1		1		1		1		1		1		1		1					

Fuente: El Autor

Tabla 10: Resultado del Análisis de Criticidad

EQUIPAMIENTO / SISTEMA	VALOR	CRITICIDAD
PRESA		
Compuerta radial del vertedero	11	No crítico
Sistema hidráulico de la compuerta radial	51,5	Semi-crítico
Stop log	11	No crítico
Pórtico de izaje del stop log	27	No crítico
Compuerta radial del desagüe de fondo	49	No crítico
Sistema hidráulico de la compuerta radial	59	Semi-crítico
Compuerta plana de mantenimiento tipo buerau	33	No crítico
Sistema hidráulico de la compuerta tipo buerau	59	Semi-crítico
Compuerta plana	33	No crítico
Sistema hidráulico de la compuerta plana	59	Semi-crítico
Rejillas de la obra de toma	38,5	No crítico
Máquina limpia rejillas	38,5	No crítico
Compuerta plana de emergencia	43	No crítico
Sistema hidráulico de la compuerta plana de emergencia	59	Semi-crítico
Stop log	11	No crítico
Pórtico de izaje del stop log	27	No crítico
CONDUCCIÓN		
Túnel de baja presión	53,5	Semi-crítico
Sistema de drenaje	48,5	No crítico
Válvula mariposa de cabecera	59	Semi-crítico
Unidad hidráulica de la válvula	51,5	Semi-crítico
Tubería de presión	41,5	No crítico
CASA DE MAQUINAS		
Válvula esférica	78,5	CRITICO
Turbina	51	Semi-crítico
Regulador de velocidad	81,5	CRITICO
Generador	68	Semi-crítico
Transformador	71	CRITICO
Sistemas auxiliares de la unidad	74	CRITICO
Sistemas auxiliares generales	31	No crítico

Fuente: El Autor

En la tabla 10 se puede observar que los equipos críticos se encuentran en la casa de máquinas específicamente en las unidades de generación. Sin embargo se debe tener en cuenta que, en la presa y el sistema de conducción también hay equipos que aunque tienen poca probabilidad de falla se consideran semi – críticos porque no tienen redundancia.

2.2.5. Diseño del modelo de mantenimiento y recursos necesarios.

Un modelo de mantenimiento es una mezcla de varios tipos de mantenimiento en proporciones determinadas y que respondan adecuadamente a las necesidades de un equipo específico (Garrido, 2003)

Según Garrido básicamente existen cuatro modelos de mantenimiento posibles, estos son:

Modelo Correctivo: Aplicable a equipos con más bajo nivel de criticidad, consiste básicamente en actividades tales como inspecciones visuales, lubricación y reparación de averías.

Modelo Condicional: Este modelo es aplicable a los equipos que tienen poco uso o que a pesar de su importancia su tasa de fallo es muy baja. Además de las inspecciones visuales y lubricación se realizan pruebas o ensayos (mantenimiento basado en condición) para detectar anomalías y programar las actividades necesarias.

Modelo Sistemático: Es un modelo utilizado en equipos de disponibilidad media y cuyas averías pueden causar algunos trastornos. Aquí se incluyen tareas independientemente de la condición y tiempo de funcionamiento del equipo. Las actividades que se realizan en este tipo de modelos son inspecciones visuales, lubricación, mantenimiento preventivo sistemático, mantenimiento condicional y reparación de averías.

Modelo de Alta Disponibilidad: Este es el modelo más exigente aplicado en equipos que por ninguna razón pueden sufrir averías y que además deben garantizar disponibilidades por encima del 90%. En este modelo por lo general se sustituyen todas las piezas sometidas a desgaste o con altas probabilidades de fallo. Además de todas las actividades realizadas en los modelos anteriores se incluye la puesta a cero periódica (parada de planta).

Los modelos condicional, sistemático y de alta disponibilidad se consideran como parte de un gran grupo llamado modelos programados.

Es importante tener en cuenta que algunos equipos suelen estar sometidos a normativas legales que obligan a que se realicen determinadas actividades con una periodicidad definida. Por otra parte algunas actividades de mantenimiento no se pueden realizar con el personal disponible en la planta ya que se requieren de conocimientos y experiencia específica normalmente brindada por los fabricantes.

2.2.6. Selección del modelo de mantenimiento

Una vez definida la jerarquía de los sistemas, el siguiente paso consiste en la selección del modelo de mantenimiento y el estudio de las estrategias existentes para su ejecución y que mejor se adapten a las condiciones de los equipos teniendo en cuenta su función dentro de la central.

Según lo visto anteriormente se podría determinar que los equipos críticos requieren el uso de uno de los modelos de mantenimiento programado, si el equipo es importante se debe estudiar un poco más las consecuencias de una avería y finalmente si el equipo es prescindible o no crítico el modelo que corresponde es un correctivo.

Para definir el modelo de mantenimiento que mejor se adapte a las condiciones de los equipos se debe hacer un estudio profundo de varios factores para lo cual se plantea el siguiente diagrama:

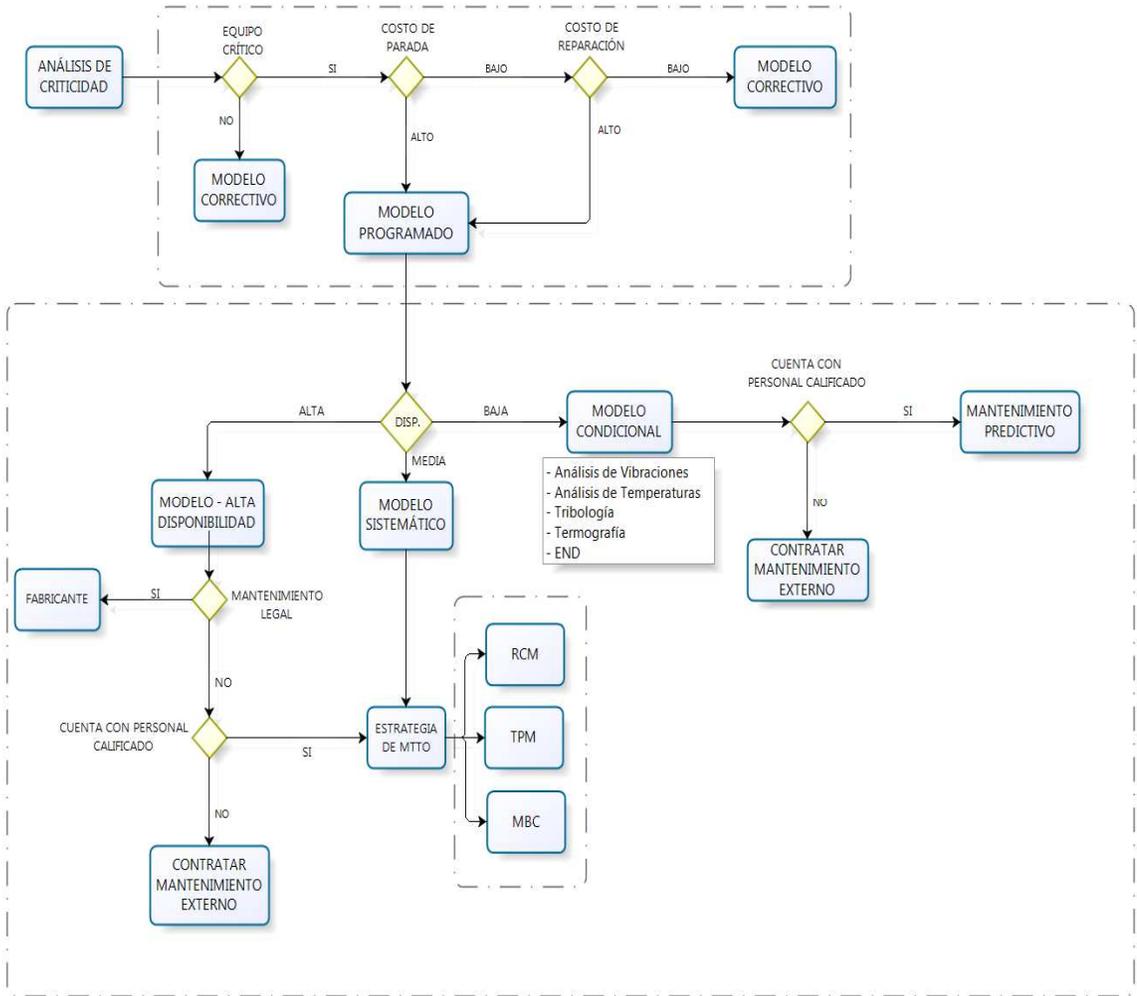


Figura 5: Matriz de decisión de modelo de mantenimiento
Fuente: El autor.

Como se puede ver en la figura 5, el último nivel corresponde a la estrategia de mantenimiento aplicable a cada uno de los equipos o sistemas analizados y por ende a la definición del programa de mantenimiento.

Para la ejecución de un programa de mantenimiento, en primer lugar se deben planear las actividades tomando en cuenta los avances tecnológicos y su adecuada implementación, y se debe concluir con la integración de varias herramientas estratégicas.

Existen varias estrategias que se utilizan para mejorar los procesos de mantenimiento, sin embargo las cuatro más utilizadas actualmente son las que se muestran en la siguiente figura.



Figura 6: Principales estrategias de mantenimiento
Fuente: Confiabilidad Humana – Oliverio García

2.2.6.1. *Mantenimiento Basado en Condición*

Al conjunto de actividades programadas, para detectar fallas antes de que sucedan y con los equipos en operación utilizando instrumentos de diagnóstico y pruebas no destructivas se le conoce como Mantenimiento Basado en Condición (CBM)

El CBM se basa en el estado de la máquina, esto permite definir qué hacer y cuando, para lo cual es necesario monitorear la condición de las máquinas mediante la medición de algún parámetro, por ejemplo, la vibración. Luego el estado de la máquina es contrastado con niveles de alarmas preestablecidos que indicarán el momento de intervenir.

Las principales técnicas utilizadas para desarrollar un plan de mantenimiento basado en la condición se listan a continuación.

- Análisis de vibraciones
- Análisis de aceites
- Termografía infrarroja
- Análisis espectral de intensidades de corrientes
- Ultrasonido
- Descargas parciales
- Ensayos no destructivos.

La desventaja del CBM es que muchas de las técnicas mencionadas requieren de un alto nivel de experticia y comúnmente en las plantas no se cuenta con personal lo suficientemente calificado para ejecutarlo.

2.2.6.2. *Mantenimiento Productivo Total*

El Mantenimiento Productivo Total (TPM) es un sistema gerencial que busca la participación de toda la organización con el fin de tener los equipos de producción siempre listos. Este tipo de mantenimiento establece las técnicas para mejorar la productividad de la empresa con la participación total del personal, desde la alta dirección hasta los operadores de bajo nivel.

Existen cinco metas que deben ser tomadas en cuenta y representan los requisitos mínimos para desarrollar un programa de mantenimiento productivo total (Mora, 2013)

- Mejora la eficacia del equipo
- Mantenimiento autónomo a cargo de los operadores
- Plan de mantenimiento administrado por el área de mantenimiento

- Entrenamiento para mejorar las destrezas y operaciones de mantenimiento
- Un programa de administración del equipo para prevenir problemas que ocurran durante nuevas instalaciones o arranque de máquinas

Para la implementación del TPM existen 8 pilares que son puntos de apoyo a ser tomados muy en cuenta e implementados sistemáticamente.

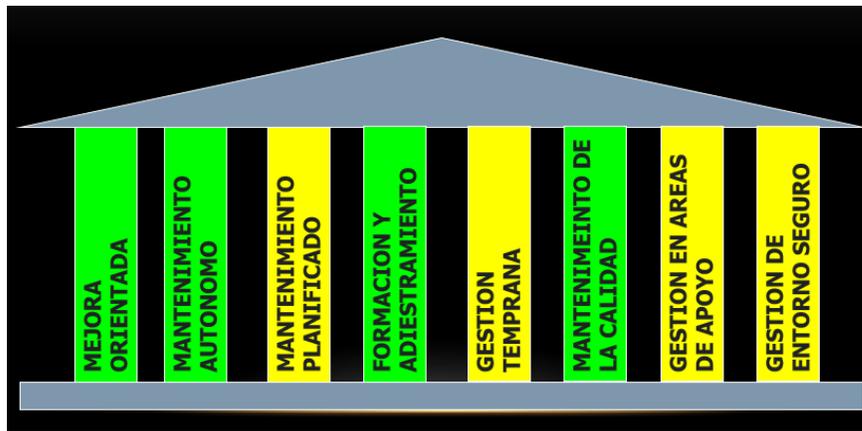


Figura 7: Pilares fundamentales del TPM

Fuente: Ing. Fernando Garcia Maestría en gestión de mantenimiento Universidad del Azuay

Si bien el TPM exige la participación de todos los niveles de la empresa y un alto grado de capacitación y formación lo cual puede resultar desventajoso en nuestro caso ya que lo que buscamos es implementar una estrategia de mantenimiento que funcione adecuadamente a corto y mediano plazo, sin embargo, contempla actividades importantes para el área de mantenimiento y que son fundamentales para la implementación de esta estrategia como son la metodología de las 5s y el mantenimiento autónomo las cuales pueden ser aplicadas conjuntamente con otras estrategias que se adapten mejor a las condiciones actuales de la Central Minas – San Francisco.

La metodología 5S es un puente hacia el TPM que se utiliza para organizar el trabajo de tal forma que se minimicen las pérdidas asegurando que las zonas de trabajo se encuentren sistemáticamente limpias y organizadas, lo cual facilita la implementación del TPM

Las 5S es una de las herramientas más comunes y fácil de entender y consiste en cinco actividades esenciales previo a la implementación del TPM, sin embargo es una de las más difíciles de aplicar. Aunque esta herramienta es de origen Japonés, los fonemas inician cada una de las palabras suenen como un S, razón por la cual el nombre de las 5S, en el siguiente cuadro se resumen de las actividades que forman parte de esta herramienta y los objetivos que persiguen cada una de ellas.

Denominación		Concepto	Objetivo particular
En Español	En Japonés		
Clasificación	整理, <i>Seiri</i>	Separar innecesarios	Eliminar del espacio de trabajo lo que sea inútil
Orden	整頓, <i>Seiton</i>	Situar necesarios	Organizar el espacio de trabajo de forma eficaz
Limpieza	清掃, <i>Seisō</i>	Suprimir suciedad	Mejorar el nivel de limpieza de los lugares
Estandarización	清潔, <i>Seiketsu</i>	Señalizar anomalías	Prevenir la aparición de la suciedad y el desorden
Mantener la disciplina	躰, <i>Shitsuke</i>	Seguir mejorando	Fomentar los esfuerzos en este sentido

Figura 8: Metodología 5s

Fuente: <https://es.wikipedia.org/wiki/5S>

El mantenimiento autónomo es uno de los pilares esenciales mediante el cual el departamento de producción participa en el TPM. Consiste en ciertas actividades sistemáticas que pueden ser desarrolladas directamente por los operarios tales como la limpieza, inspecciones, ajustes entre otras.

El propósito de un programa de mantenimiento autónomo consta de tres partes. Primera, integrar al personal de mantenimiento y producción para conseguir un fin común. Segunda ayudar a los encargados de la operación de los equipos para conocer más sobre los equipos que se encuentran operando y los problemas o fallos que se pueden presentar. Tercera un programa que permita a los operarios participar activamente en la mejora del rendimiento de sus equipos. (Shirose, 1994)

La puesta en marcha del mantenimiento requiere una aproximación paso a paso, es decir que cada actividad es conocida a fondo antes de pasar a la siguiente. Para el desarrollo del mantenimiento autónomo se establecen los siguientes siete pasos:

- 1) Limpieza inicial
- 2) Eliminación de fuentes de contaminación y áreas inaccesibles
- 3) Creación de estándares de limpieza y lubricación
- 4) Inspección general
- 5) Inspección autónoma
- 6) Organización y orden del lugar de trabajo
- 7) Programa de mantenimiento autónomo totalmente implantado

Los tres primeros pasos originan las condiciones básicas de los equipos que son primordiales para un mantenimiento autónomo eficaz.

2.2.6.3. *Mantenimiento Centrado en Confiabilidad*

El RCM desde el punto de vista de gestión de mantenimiento, se basa en el estudio de los equipos, en el análisis de los modos de fallo y en la aplicación de técnicas estadísticas. (Garrido, 2003).

La técnica del RCM está fundamentada básicamente en:

- Evaluación del estado y función de los componentes de los equipos
- Identificación de equipos críticos
- Aplicación de técnicas predictivas y proactivas
- Revisión y análisis permanente del estado funcional de los equipos

El RCM basa su esquema en el constante cuestionamiento de las actividades de mantenimiento que da lugar a las siguientes preguntas:

- ¿Cuáles son las funciones y los estándares de rendimiento del activo en su contexto operacional actual?
- ¿En qué formas falla el activo, dejando de cumplir sus funciones?
- ¿Cuál es la causa de cada fallo funcional?
- ¿Qué pasa cuando ocurre cada fallo?
- ¿Qué importancia tiene cada fallo?
- ¿Qué puede hacerse para predecir o prevenir cada fallo?
- ¿Qué debe hacerse si no puede encontrarse una tarea proactiva adecuada?

Como se puede ver, todas las estrategias estudiadas requieren de un largo proceso y formación de equipos de trabajo para su implementación, además del compromiso de la alta dirección de la empresa. Sin embargo existen varias actividades que pueden ser desarrolladas mientras se define si es o no factible la implementación de una estrategia de mantenimiento específica.

Todas las técnicas analizadas en este capítulo son complementarias entre ellas; por ejemplo, mientras el TPM mejora la productividad el RCM permite aumentar la confiabilidad y la disponibilidad, por otra parte el MBC está inmerso dentro de las actividades tanto del TPM como del RCM, por lo tanto; la combinación de estas técnicas facilitaran el trabajo conjunto entre mantenimiento y operación, mejoraran las fiabilidad de los equipos y reducirán los costos de operación y mantenimiento.

La relación clave entre TPM y RCM radica en que los principios de organización y confiabilidad se combinan. El RCM permite determinar los principales requerimientos de mantenimiento dentro del contexto operativo de los equipos y con el TPM se consigue que estos requerimientos sean difundidos como los más efectivos y económicos.

2.2.7. Análisis de los equipos críticos

Una vez estudiados las principales estrategias o técnicas de mantenimiento. A continuación se presenta un análisis detallado de los equipos críticos determinados anteriormente y se establecen las actividades o tipos de mantenimiento que aplican a cada uno de ellos. Finalmente se recomendará cual es la o las estrategias que se deben implementar dependiendo de la situación y función específica de cada uno de los sistemas y equipos.

2.2.7.1. Zona 1: Presa

La presa tiene una altura de 54m tomando como referencia el nivel actual del río, la longitud de la corona es 295 m y su elevación es la 795 msnm. La presa tiene 3 vertederos de excedencias (8,9 x 9,10 m) y 2 desagües de fondo (5 x 6) cuyo equipamiento hidromecánico lo constituyen compuertas de tipo radial. Además en la zona de la presa también se ubica la obra de toma equipada con una compuerta de emergencia, un stop log para mantenimiento y dos juegos de rejillas.

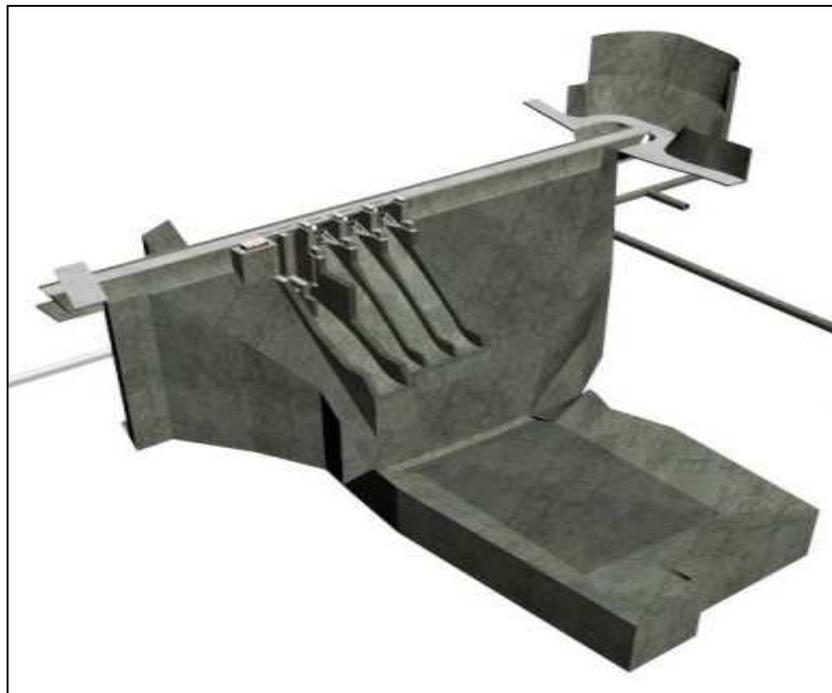


Figura 9: Presa de la Central Minas San Francisco

Fuente: <https://www.celec.gob.ec/enerjubones/recursos/planos-3d/presa.html>

Desagüe de fondo.

El Desagüe de Fondo de la presa del Proyecto Hidroeléctrico Minas-San Francisco se localiza en el cuerpo de la presa hacia la margen derecha, y tiene la función de regular tanto los caudales como los sedimentos de la presa.

Tabla 11: Características técnicas del desagüe de fondo

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL DESAGÜE DE FONDO	
CARACTERÍSTICAS GENERALES	
No. De unidades	2
Crecida de diseño	520 m ³ /s
Dimensiones	5000 x 6000
Disipación de energía	Salto en esquí
EQUIPAMIENTO HIDROMECÁNICO	
Compuertas	
Tipo	Radial [1]
Accionamiento	Hidráulico
Elevación de la solera	749,00 msnm
NAMO	792,86 msnm
NAMINO	783,33 msnm
Stop Logs	
tipo	Deslizante [2]
Accionamiento	Hidráulico
Elevación de la solera	Variable
NAMO	792,86 msnm
NAMINO	783,33 msnm

Fuente: El Autor

Vertedero.

La presa en su cota superior cuenta con tres vertederos de excesos impidiendo que el nivel de agua se eleve sobre el máximo establecido y de esta forma proteger la integridad de la presa.

Tabla 12: Características técnicas del vertedero de excesos

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL VERTEDERO DE EXCESOS	
CARACTERÍSTICAS GENERALES	
No. De unidades	3
Crecida de diseño	1565 m ³ /s
Dimensiones	8900 x 9100
Disipación de energía	Salto en esquí
EQUIPAMIENTO HIDROMECÁNICO	
Compuertas	
Tipo	Radial [1]
Accionamiento	Hidráulico
Elevación de la solera	783,06 msnm
NAMO	792,86 msnm
NAMINO	783,33 msnm
Stop Logs	
tipo	Deslizante [1]
Accionamiento	Pórtico grúa
Elevación de la solera	783,90 msnm
NAMO	792,86 msnm
NAMINO	783,33 msnm

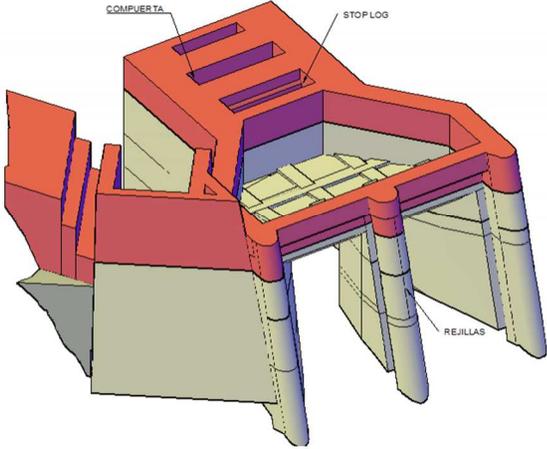
Fuente: El Autor

Obra de toma.

La captación es la estructura diseñada para captar el caudal de diseño en condiciones adecuadas de cantidad y calidad, para a través de la conducción llegar a casa de máquinas y mover los equipos de generación.

Tabla 13: Características técnicas de la obra de toma

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LA OBRA DE TOMA	
CARACTERÍSTICAS GENERALES	
Caudal de diseño	65 m ³ /s
Número de rejillas	2
Dimensiones rejillas	7600 x 12000mm
Cota de la solera	772,00 msnm
EQUIPAMIENTO HIDROMECAÁNICO	
Compuertas	
Tipo	De ruedas [1]
Accionamiento	Hidráulico
Dimensiones	4500 x 4500 mm
NAMO	792,86 msnm
NAMINO	783,33 msnm
Stop Logs	
tipo	De ruedas [1]
Accionamiento	Pórtico grúa
Dimensiones	4500 x 4500 mm
NAMO	792,86 msnm
NAMINO	783,33 msnm



Fuente: El Autor

2.2.7.2. Zona 2: Conducción

El sistema de conducción de la Central Hidroeléctrica Minas San Francisco consiste en un túnel de baja presión que inicia en la obra de toma, una cámara de válvulas para el drenaje del túnel de baja presión, una válvula mariposa de cabecera, chimenea de equilibrio ubicada y la tubería de presión de 3770 mm que inicia en la válvula mariposa hasta el ingreso a la casa de máquinas.

Túnel de baja presión.

El túnel de carga debe conducir los caudales que ingresan por la obra de toma en el sitio de la presa San Francisco, hacia la chimenea de equilibrio y desde aquí a lo largo de la tubería de presión hasta la Central de Generación Hidroeléctrica. El túnel de baja presión está construido con las secciones que se muestran en la siguiente figura.

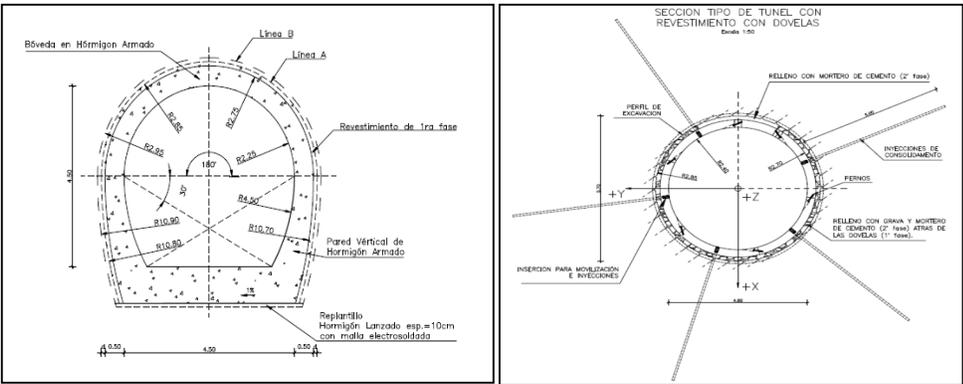


Figura 10: Sección del túnel de conducción
Fuente: Diseño definitivo Proyecto Minas San Francisco - Informe Hidráulico.

Drenaje del túnel de baja presión.

Las obras de descarga del túnel de baja presión del aprovechamiento San Francisco deben ser diseñadas para garantizar que se pueda descargar toda el agua en el túnel de carga, una vez que la válvula mariposa aguas arriba de la chimenea de equilibrio sea abierta.

El agua será descargada por medio de una tubería en acero revestido con dos válvulas de compuerta plana vertical. Las dos válvulas sirven para garantizar más seguridad en la junta hidráulica.

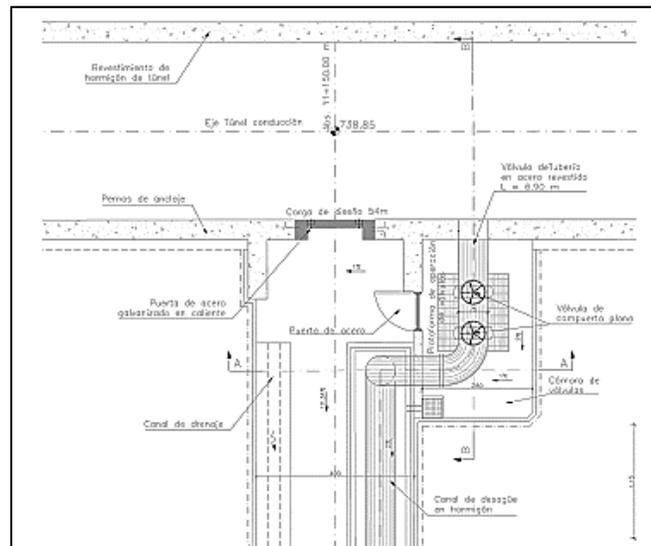


Figura 11: Sistema de drenaje del túnel de conducción

Fuente: Diseño definitivo Proyecto Minas San Francisco - Informe Hidráulico.

2.2.7.3. Zona 3: Casa de máquinas

La Casa de Máquinas San Francisco, que se ubica subterránea o en caverna, en el sector de Gramalote. Esta estructura debe alojar, como estructura principal, a las tres turbinas tipo Pelton, de eje vertical, posicionada en la cota 281,32 m.s.n.m y tres generadores ubicados en el nivel 287,4 m.s.n.m. El piso principal se ubica en la cota 292,25 m.s.n.m. Adicionalmente, se dispondrá de una caverna separada para alojar los transformadores. La Subestación Eléctrica será ubicada al exterior, en el mismo sector de Gramalote, y conectada a los transformadores a través un pozo de cables.



Figura 12: Casa de Máquinas Central Minas San Francisco
Fuente: <https://www.celec.gob.ec/enerjubones/>

Como se determinó anteriormente, los equipos más críticos de la central corresponden a las unidades de generación, este tipo de equipos demandan factores de disponibilidad por encima del 98%. Por lo tanto, a continuación se indican a detalle las características de los componentes principales y sistemas auxiliares o subsistemas que hacen parte de la unidad de generación.

Tabla 14: Características técnicas de las unidades de generación

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LAS UNIDADES DE GENERACIÓN					
VÁLVULA DE GUARDIA			GENERADOR		
Tipo	Esférica		Tipo	Semi paraguas	
Cantidad	3	u	Cantidad	3 u	
Caudal de diseño	21,66	m ³ /s	Factor de potencia	90%	
Caída Bruta	508,36	m	Potencia	90,31 MW	
Presión máxima de trabajo	559	mca	Eficiencia	98,30%	
Presión de diseño	614,9	mca	Voltaje de salida	13,8 kV	
Velocidad de flujo	5,82	m/s	No. De polos	20 u	
Diámetro interno	2200	mm	Velocidad de giro	360 rpm	
Accionamiento	Hidráulico		Protección	IP 41	
Ángulo de giro	90°		Tipo de aislamiento	F	
TURBINA			Sistema de excitación	Estática	
Tipo	Pelton		TRANSFORMADOR ELEVADOR		
Cantidad	3 u		Potencia	120 MVA	
Caudal	22 m ³ /s		Enfriamiento	OFWF	
Potencia	91,87 MW		Relación de transformación	13,8/230	kV
Rendimiento	91,50%		Grupo de conexión	YNd1	
No. De inyectores	6 u		Impedancia	12%	
Velocidad de giro	360 rpm		Aceite aislante	Dieléctrico mineral	
Diámetro de la rueda	2419 mm				
No. De alabes	24 u				



Fuente: El Autor

Además, las unidades de generación requieren de otros equipos y sistemas para operar adecuadamente tales como el regulador de velocidad cuya función es la de suministrar aceite a presión para la apertura y cierre de los inyectores de la turbina y hacia los servomotores de la válvula esférica.

Los reguladores sensan la velocidad de giro/carga del grupo turbina-generator, emiten una señal acorde a la diferencia entre la velocidad/carga del grupo, y la referencia de velocidad/carga del regulador, y luego una señal de control hidráulica de suficiente potencia, para regular a los servomotores principales y controlar la respuesta de la turbina, de acuerdo a los requerimientos de

funcionamiento de la unidad. El regulador de velocidad debe contar con elementos sensores de velocidad, transductores de potencia eléctrica para el estatismo, actuador de control del regulador, sistemas de suministro de aceite para control y de aire comprimido, y todos los accesorios requeridos para controlar la potencia y la velocidad de la unidad generadora.

Otro sistema importante para el correcto funcionamiento de las unidades de generación es el sistema de agua de enfriamiento. Este sistema toma el agua desde una fuente externa y es conducida hacia los intercambiadores de calor de los cojinetes, radiadores del generador y sistema de enfriamiento de los transformadores.

Previo al ingreso de agua a los intercambiadores de calor, el fluido pasa a través de varios equipos e instrumentos como filtros y válvulas que garantizan que el agua que entra a los cojinetes sea de la cantidad y calidad adecuada.

Por otra parte, dentro de la casa de máquinas también se encuentran instalados sistemas auxiliares que permiten garantizar condiciones óptimas de confort para el personal y seguridad para las instalaciones tales como:

- Sistema de agua de servicio
- Sistema de drenaje
- Sistema sanitario
- Sistema contra incendio
- Sistema de ventilación y aire acondicionado
- Sistema de ventilación etc.

2.2.7.4. Zona 4: Sub estación

La subestación de tipo convencional recibe potencia desde las unidades de generación a través de los transformadores de elevación 13,8/230 KV y los respectivos cables de potencia y la transmite hacia a la subestación San Idelfonso en el cantón el Guabo a través de una línea de transmisión de doble circuito a 230KV.

Debido a la diferencia despreciable en costo del esquema de interruptor y medio con respecto al de doble barra, al menor espacio requerido y a las mayores facilidades de mantenimiento, se ha preferido para las subestaciones de esta central el esquema de interruptor y medio.

En función del estudio de criticidad de los equipos, se plantean las estrategias de mantenimiento que aplican a cada uno de ellos y se determinan las actividades a desarrollar, finalmente se ha establecido el siguiente modelo de gestión de mantenimiento para la Central Hidroeléctrica Minas San Francisco.

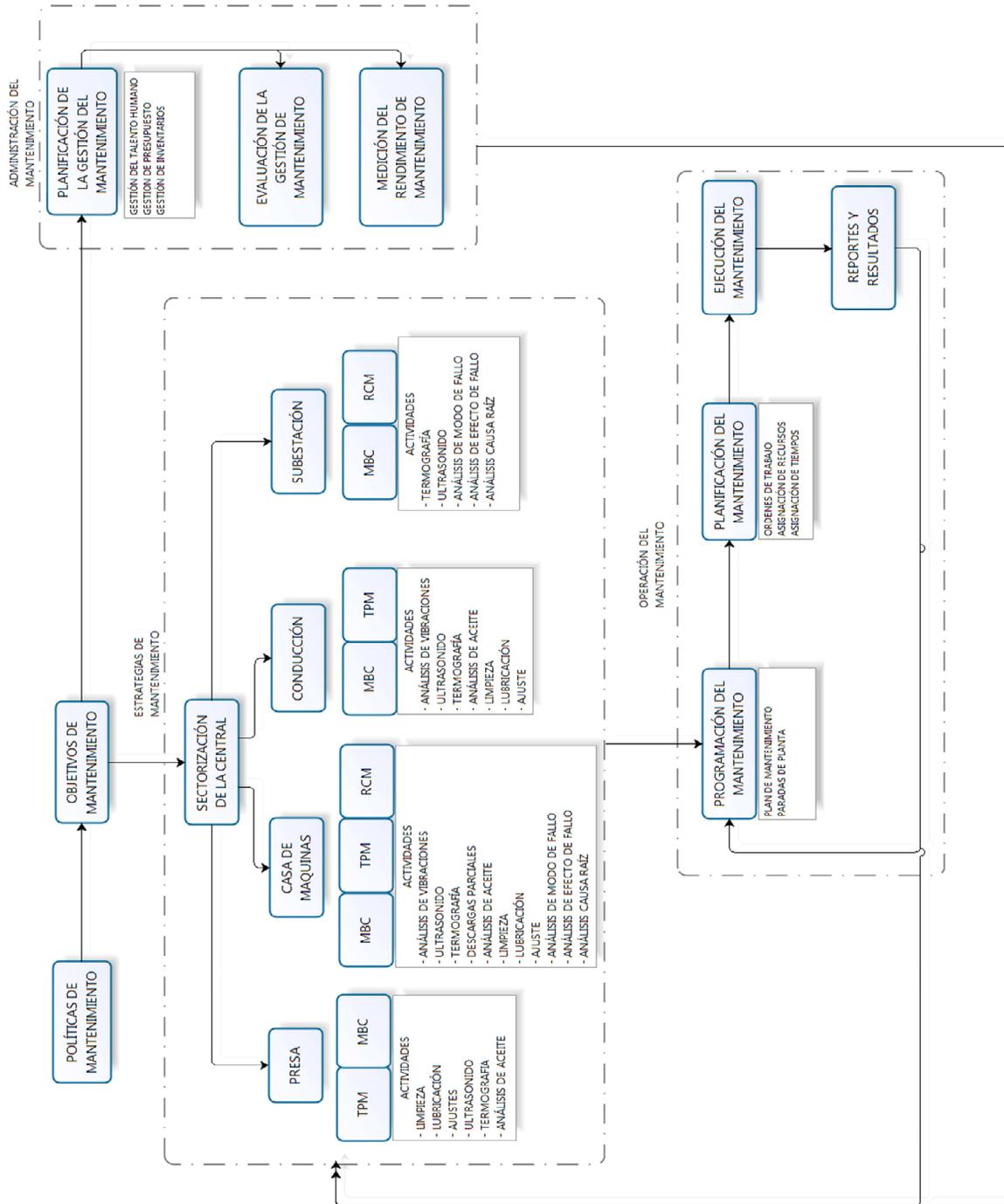


Figura 13: Modelo de Gestión de Mantenimiento de la Central Hidroeléctrica Minas – San Francisco
Fuente: El Autor

CAPITULO 3

EVALUACIÓN DEL MANTENIMIENTO E INDICADORES DE GESTIÓN

Es capítulo busca definir una metodología para evaluar la gestión de mantenimiento propuesta y determinar los indicadores claves más adecuados para medir el desempeño del mantenimiento y su jerarquización de acuerdo al nivel de incidencia en la toma de decisiones que ayuden a conseguir los objetivos estratégicos planteados por la corporación.

Para llevar a cabo un proceso de evaluación del modelo de mantenimiento, en primer lugar es importante definir los objetivos que aspiramos conseguir con la gestión integral de mantenimiento. Se pueden diferenciar los objetivos propios de mantenimiento y los objetivos estratégicos de la corporación, sin embargo estos siempre deben ser aplicados paralelamente.

3.1. Evaluación de la gestión del mantenimiento

En el apartado 2.2.3 se definieron los objetivos de mantenimiento, a continuación se establecen las áreas de actuación para conseguirlos y sus respectivos valores o metas a alcanzar en cada una de ellas.

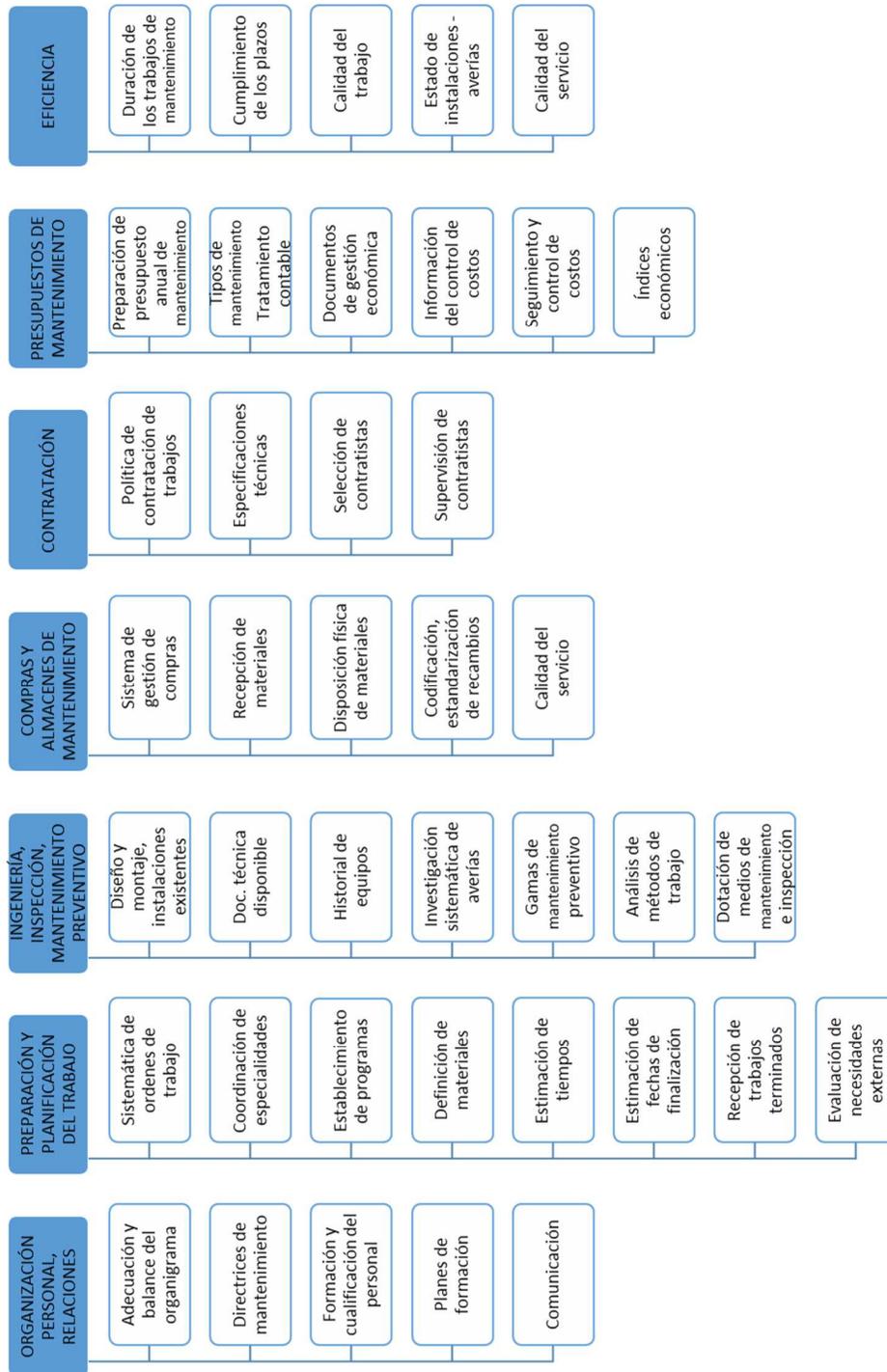
Tabla 15: Áreas de actuación para la evaluación de mantenimiento

No	Categoría de la gestión de Mantenimiento	META
1	ORGANIZACIÓN, PERSONAL, RELACIONES	15
2	PREPARACIÓN Y PLANIFICACIÓN DEL TRABAJO	13
3	INGENIERIA, INSPECCIÓN, MANTENIMIENTO PREVENTIVO.	15
4	COMPRAS Y ALMACENES DE MANTENIMIENTO	14
5	CONTRATACION	14
6	PRESUPUESTOS DE MANTENIMIENTO	14
7	EFICIENCIA	15
	Total	100

Fuente: El Autor

A su vez cada una de las áreas funcionales tiene varios aspectos a evaluar tal como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 16: Aspectos de evaluación



Fuente: El Autor

A cada uno de estos aspectos se les asigna un valor de ponderación en función del peso que consideremos que debe tener cada uno para llevar a cabo una buena gestión de mantenimiento. Una vez asignados los valores se procede a evaluar cada uno en una escala del 1 al 10, para esto se utilizará la siguiente matriz.

Tabla 17: Matriz de evaluación de mantenimiento

DIAGNOSTICO DE LA GESTION DEL MANTENIMIENTO																
% Ponderación AREAS A	ITEM	AREAS / FUNCIONALES	% Ponderación FUNCIONES B	C = CALIFICACION AREA/FUNCION (10 Perfecto)										% Calificación AREA $D = \frac{B \times C}{10}$	% Calificación MTO $F = \frac{A \times D}{100}$	
				0	1	2	3	4	5	6	7	8	9			10
15	1	ORGANIZACIÓN, PERSONAL, RELACIONES	100	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
13	2	PREPARACIÓN Y PLANIFICACIÓN DEL TRABAJO	100	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
15	3	INGENIERIA, INSPECCIÓN, MANTENIMIENTO PREVENTIVO.	100	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
14	4	COMPRAS Y ALMACENES DE MANTENIMIENTO	100	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
14	5	CONTRATACION	100	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
14	6	PRESUPUESTOS DE MANTENIMIENTO	100	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
15	7	EFICIENCIA	100	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		

- No conformidad mayor
- No conformidad menor
- Aceptable

Fuente: El Autor

Finalmente el resultado de la evaluación será la calificación del mantenimiento de cada una de las áreas representadas en valores porcentuales y se representaran en un gráfico de radar comparando el valor esperado o metas y la calificación obtenida.

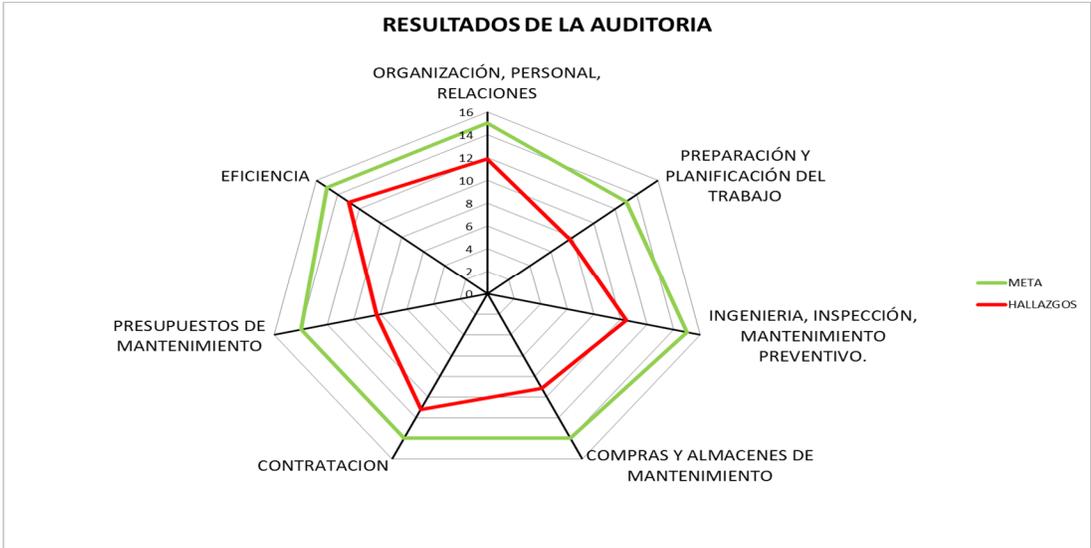


Gráfico 4: Presentación de resultados de la evaluación
Fuente: El Autor

Una vez identificadas las áreas menos satisfactorias es importante elaborar un plan de acción el cual debe contener las causas por las cuales no se pudieron alcanzar los objetivos, la acción a ejecutar para mejorar, el tiempo, responsables y presupuesto.

3.2. Indicadores de la gestión de mantenimiento

Según la norma EN 15341 "Mantenimiento, Indicadores principales de desempeño" el sistema de indicadores de rendimiento del mantenimiento está estructurado en tres grupos:

- Indicadores técnicos
- Indicadores económicos
- Indicadores organizacionales

El uso de indicadores permite definir estrategias y objetivos cuando el desempeño real del mantenimiento no sea el esperado o satisfactorio, mejorando desde el punto de vista económico, técnico y organizativo (AENOR, 2008)

3.3. Selección de indicadores

Para la selección de los indicadores de gestión más adecuados es necesario tener claramente definidos los objetivos de la gestión de mantenimiento e identificados los parámetros de rendimiento a controlar.

3.3.1. Objetivo de la gestión de mantenimiento

Asegurar la máxima disponibilidad de las instalaciones de la Central Hidroeléctrica Minas – San Francisco alargando su vida útil optimizando los medios humanos y materiales.

3.3.2. Parámetros a controlar

Para establecer los indicadores de mantenimiento, debemos tener claro que parámetros de la gestión del mantenimiento deseamos controlar, estos parámetros se pueden dividir en tres grupos: los que buscan determinar la eficacia del mantenimiento, los que indican la eficiencia y los que miden la efectividad (Luis Navarro, 1997).

En el primer caso el control se basa en el análisis de los resultados obtenidos y las acciones ejecutadas desde el punto de vista técnico sin tener en cuenta el coste y los recursos empleados. En este caso los parámetros que se pretenden controlar son:

Tabla 18: Indicadores clave técnicos

INDICADOR	DESCRIPCIÓN	FORMULA
Tiempo de indisponibilidad por fallos	Mide el tiempo de indisponibilidad perdido a causa de fallos	$TIF = \frac{HOP}{HPO+HIF} * 100$
Tiempo de indisponibilidad por mantenimiento	Mide el tiempo total de trabajos de mantenimiento planificado y programado que requieren tiempo de indisponibilidad	$TIM = \frac{HOP}{HPO+HIM} * 100$
Tiempo medio entre fallos (MTBF)	Mide el tiempo medio entre cada ocurrencia de una parada específica por fallo (o avería). Permite determinar que paradas son más frecuentes.	$MTBF = \frac{HOP}{\text{Número de fallos}}$
Tiempo medio entre reparaciones (MTTR)	Mide el tiempo medio utilizado para reparar una falla o avería. Este índice indica cuales fallas son más graves.	$MTTR = \frac{HTR}{\text{Número de fallos}}$
<p><i>TIF: Tiempo de indisponibilidad por fallo</i> <i>TIM: Tiempo de indisponibilidad por mantenimiento</i> <i>HOP: Horas totales de operación</i> <i>HIF: Horas de indisponibilidad por fallo</i> <i>HIM: Horas de indisponibilidad por mantenimiento</i> <i>HTR: Horas totales de recuperación o reparación</i></p>		

Fuente: El Autor

Tomando en cuenta que muchas veces los recursos de mantenimiento son limitados, es importante relacionar los resultados obtenidos y los recursos empleados, este tipo de indicadores son conocidos como la eficiencia del mantenimiento y son parte del grupo de indicadores económicos.

Tabla 19: Indicadores clave económicos

INDICADOR	DESCRIPCIÓN	FORMULA
Costos de disponibilidad	Mide el tiempo que un activo está en condiciones de operar y los recursos utilizados en mantenimiento	$CDIS = \frac{1 - TIM}{CTM}$
Costos de mantenimiento preventivo	Mide los recursos dedicados a mantenimiento preventivo	$CMP = \frac{RMP}{CTM} * 100$
Costos de mantenimiento correctivo	Mide los recursos dedicados a mantenimiento preventivo	$CMC = \frac{RMC}{CTM} * 100$
<p><i>CDIS: Costo de disponibilidad</i> <i>CTM: Costo total de mantenimiento</i> <i>CMP: Costo de mantenimiento preventivo</i> <i>RMP: Recursos utilizados en mantenimiento preventivo</i> <i>CMC: Costo de mantenimiento correctivo</i> <i>RMC: Recursos utilizados en mantenimiento correctivo</i></p>		

Fuente: El Autor

Por último el tercer grupo de parámetros a controlar es la efectividad de la organización del mantenimiento. Este tipo de indicadores considera al mantenimiento como un sistema que influye y está influenciado por el medio ambiente, en nuestro caso la producción de energía eléctrica. Este indicador compara simultáneamente la inversión realizada, el beneficio obtenido y el recurso humano empleado, es decir cualquier acción que incremente los costos de mantenimiento.

Tabla 20: Indicadores clave organizacionales

INDICADOR	DESCRIPCIÓN	FORMULA
Horas hombre de mantenimiento correctivo	Mide el tiempo empleado por el personal en mantenimiento correctivo	$\frac{\text{Horas hombre de correctivo}}{\text{Horas totales de mtto.}}$
Horas hombre de mantenimiento preventivo	Mide el tiempo empleado por el personal en mantenimiento preventivo	$\frac{\text{Horas hombre de preventivo}}{\text{Horas totales de mtto.}}$
Cumplimiento del programa de mantenimiento	Mide los recursos dedicados a mantenimiento preventivo	$\frac{\text{OT. Ejecutadas}}{\text{OT. Programadas}}$

Fuente: El Autor

CAPITULO 4

GESTIÓN DE REPUESTOS E INVENTARIOS

Uno de los pilares fundamentales del mantenimiento es la gestión de repuestos, el tiempo de espera de un repuesto suele ser una de las causas más influyentes en las paradas de producción.

En este trabajo no se profundizará el tema sobre la gestión del almacén, pero si se abordarán los aspectos que se debe tener en cuenta y los pasos a seguir para llevar a cabo una adecuada gestión de repuestos.

- Selección y limitación de repuestos
- Fijar el stock necesario
- Gestión eficaz del stock

4.1. Selección de los repuestos

Este paso busca determinar los repuestos necesarios con mayor o menor probabilidad, para esto es importante conocer los elementos que componen la instalación e identificar su forma de fallo y las posibles causas de fallo.

Para determinar las piezas de repuesto, estas se agrupan en función del rol que cumple cada una dentro del equipo:

a) Piezas sometidas a desgaste

Forman parte de este grupo los elementos utilizados para unir las partes fijas y las móviles tales como rodamientos, cojinetes, herramientas de corte etc. Normalmente este tipo de piezas están sometidas a desgaste por erosión, fricción, cavitación y corrosión.

b) Piezas de regulación o mando

Este tipo de piezas pueden no estar sometidas a condiciones de trabajo severas, sin embargo son responsables del control de los equipos, por ejemplo válvulas, resortes, bielas entre otras, usualmente estas piezas están sometidas a fatiga.

c) Piezas móviles

Aquí se agrupan las piezas que están destinadas para la transmisión de movimientos tales como correas, poleas, ejes, rotores etc. Usualmente están sometidas a desgaste por fatiga sin embargo su diseño robusto limita las posibilidades de fallo.

d) Piezas electrónicas

Son componentes de alta fiabilidad y sus principales causas de fallo pueden ser sobretensiones, cortocircuitos y calentamientos.

e) Piezas de estructura

Estos elementos se encuentran sometidos a condiciones de trabajo mucho más inferiores que las capacidades para las que fueron diseñadas: bastidores, estructuras, soportes etc. Su principal causa de fallo es debido a causas externas.

Como conclusión del análisis de estos cinco grupos, se podría decir que es necesario más piezas o repuestos del grupo uno para poder hacer frente a las reparaciones o mantenimiento preventivo.

4.2. Fijación de stocks

Es tarea del personal de operación como usuarios de los equipos y de mantenimiento establecer el rol que cumplen las máquinas en la cadena de producción y definir el tiempo máximo que pueden estar fuera de servicio, operación establecerá el tiempo máximo que puede prescindir de un equipo mientras que mantenimiento debe determinar los repuestos necesarios para cumplir los plazos.

En función de los tiempos de reparación, los equipos se pueden dividir en tres categorías:

a) Categoría 1

En esta categoría se ubican los equipos que afectan a la producción y deben ser reparados en el menor tiempo posible, por tanto es necesario mantenerlos en stock.

b) Categoría 2

Son equipos cuyos fallos pueden provocar pérdidas tolerables de producción, sin embargo, su reparación no podrá prolongarse más allá de una semana sin embargo es importante tenerlos localizados.

c) Categoría 3

En esta categoría se encuentran los equipos que no están directamente involucrados en la producción. El tiempo de indisponibilidad no afecta a la producción por lo tanto los tiempos de reparación pueden ser mayores a una semana.

Además para determinar el stock más óptimo de piezas de repuesto en el almacén, se debe tener en cuenta los siguientes aspectos:

- Criticidad del equipo
- Consumo
- Plazo de aprovisionamiento
- Costo de la pieza
- Costo de la pérdida de producción

4.3. Gestión de stock

Para establecer la cantidad de material necesario mantener en stock es importante determinar los elementos y equipos de central, cual es la función de cada uno de ellos y su posible forma de fallo. Por lo tanto a continuación se presenta un modelo a seguir para determinar el stock que se debe mantener en función del análisis de fallos.

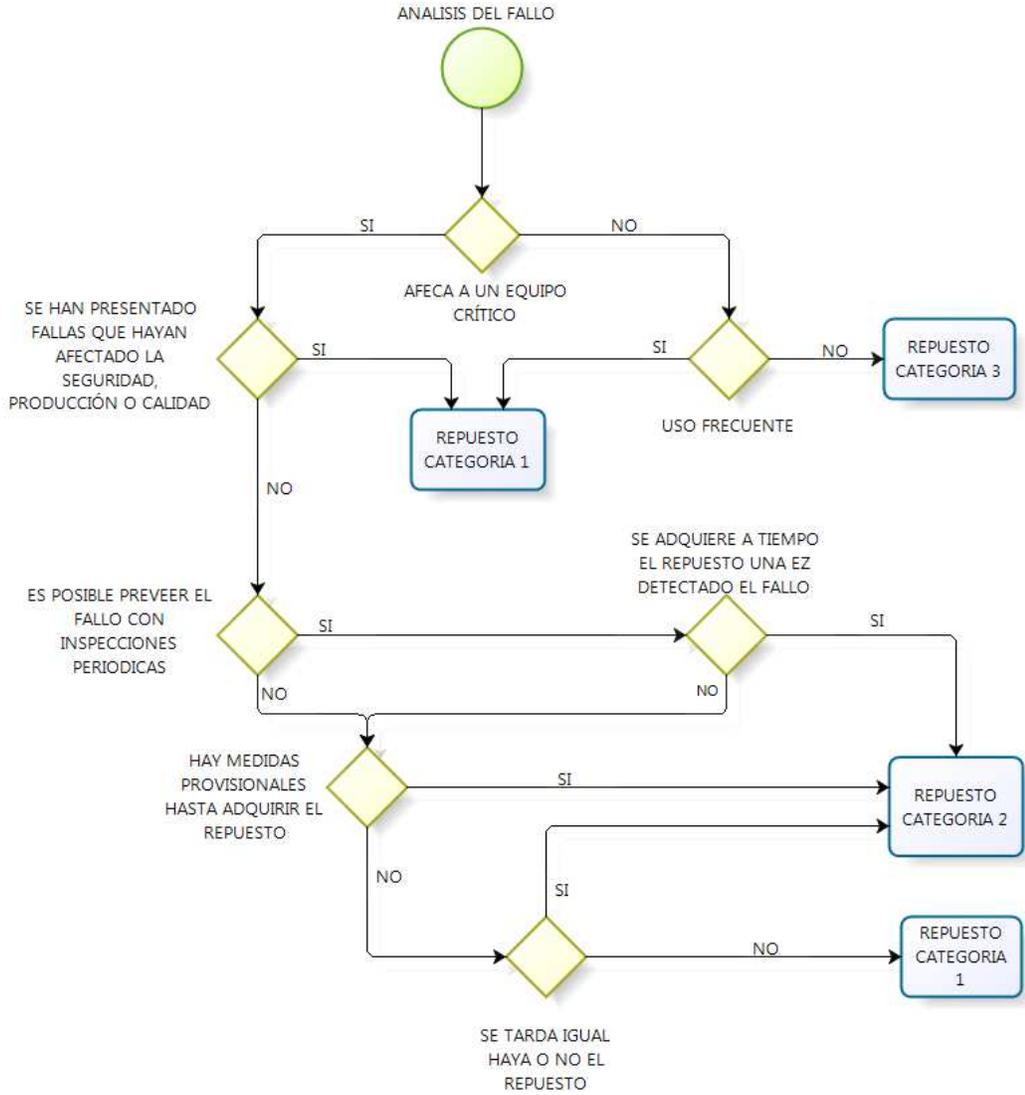


Figura 14: Matriz para determinar el stock de materiales y repuestos
Fuente: El Autor

CAPITULO 5

GESTIÓN DEL TALENTO HUMANO DEL MANTENIMIENTO

El talento humano, comúnmente llamado recurso humano o mano de obra, debe ser gestionado adecuadamente dentro de la empresa desde su contratación hasta la asignación de los trabajos, ya que conjuntamente con los activos físicos, procesos de operación y la generación de información permiten generar valor agregado y organizaciones competitivas y sostenibles en el tiempo.

5.1. Factores que determinan el organigrama de mantenimiento

5.1.1. Tamaño de la empresa

El tamaño de la empresa juega un papel importante para la definición de la organización de mantenimiento y se va desarrollando paralelamente a la evolución de las instalaciones.

En el caso de empresas pequeñas, generalmente el mantenimiento está inmerso en la propia línea de producción, por lo tanto depende de un solo responsable.

Para empresas grandes, el mantenimiento es independiente de la producción cada uno con un profesional responsable y ambos bajo la dependencia de una dirección común.

Para el caso de Celec EP - Unidad de Negocio Enerjubones, se plantea que tanto el área de producción como mantenimiento operen de forma paralela bajo la dirección de la jefatura de la central, además; tomando en cuenta que la Central es considerada dentro de un entorno estratégico para el desarrollo productivo del país, se incluye un área de apoyo llamada Ingeniería de mantenimiento la cual está al mismo nivel jerárquico de la jefatura de central y ambas bajo la dirección de la subgerencia de generación tal como se muestra en la siguiente figura.

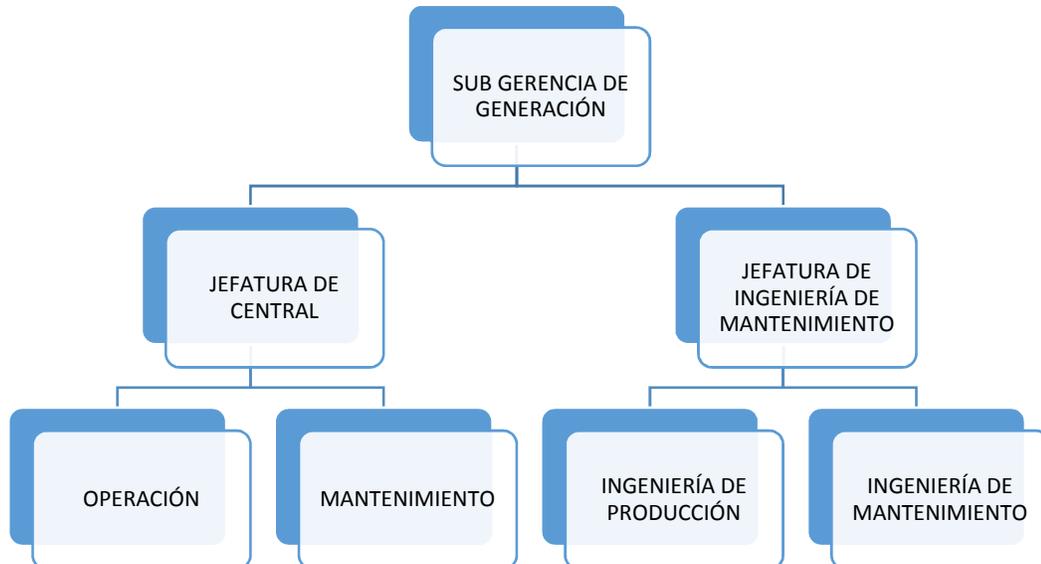


Figura 15: Esquema organizacional para la gestión de mantenimiento

Fuente: El Autor

5.1.2. Estrategias de mantenimiento

Tal como se indicó anteriormente, este estudio lo que busca es determinar la o las estrategias de mantenimiento acorde a la situación de la central, avances tecnológicos y el entorno propio del tipo de instalaciones. Por esta razón se ha puesto mucho énfasis en la aplicación de las estrategias TPM y RCM combinadas lo cual requiere involucrar al personal de producción en

tareas básicas de mantenimiento y personal con un grado elevado de especialización para las tareas propias del RCM. Algunas ventajas que se obtienen con esta integración son:

- El operador evitará maniobras que puedan causar averías a los equipos.
- El operador controlará que a sus equipos se hagan los mantenimientos preventivos necesarios para evitar paradas inesperadas.
- Estará en capacidad de detectar cualquier anomalía en el funcionamiento de los equipos y comunicará oportunamente al personal de mantenimiento.
- Algunas tareas básicas como, limpieza, ajuste, lubricación se realizarán en el momento oportuno.

Esto implica que el departamento de mantenimiento también debe adaptarse a las condiciones de operación de los equipos. En este sentido a continuación se definen las siguientes etapas de gestión del talento humano de mantenimiento:

Etapa 1: Corresponde a los operarios y consiste en la ejecución de tareas básicas de mantenimiento tales como, detección de ruidos, verificación de niveles, lubricación, control de fugas, limpieza entre otras.

Etapa 2: Es responsabilidad del personal de mantenimiento en coordinación con el área de operación ejecutar los trabajos que requieran un mayor conocimiento como son los mantenimientos correctivos, desmontaje de equipos, modificaciones, mantenimiento preventivo etc.

Etapa 3: Esta etapa se compone de dos partes importantes; la primera, la parte logística que se encarga de la gestionar los recursos tanto físicos (materiales y repuestos), económicos y humanos, y los medios para la ejecución de los trabajos. Por otra parte y en forma paralela está el componente de ingeniería que es la responsable del análisis y optimización del mantenimiento, formación del personal para cumplir las etapas 1 y 2, análisis de fallos o averías etc.

5.2. Organigrama de mantenimiento.

En función de lo expuesto, para llevar a cabo la gestión de mantenimiento de la Central Minas – San Francisco se plantea el siguiente organigrama:



Figura 16: Organigrama funcional para la gestión de mantenimiento
Fuente: El Autor

Al momento de dimensionar el departamento de mantenimiento, es importante tener claras las necesidades de producción y las consecuencias de un paro imprevisto provocado por una falla, por esta razón es importante fijar el horario que debe cumplirse teniendo en cuenta que se debe garantizar la disponibilidad fijada de las instalaciones sin descuidar la legislación vigente en el código de trabajo.

CONCLUSIONES

El presente estudio demostró que las principales estrategias de mantenimiento tales como TPM, RCM y MBC pueden llegar a ser complementarias entre ellas.

La combinación de diferentes actividades del TPM y RCM facilitan el trabajo en equipo entre las funciones de operación y mantenimiento, mientras que un adecuado plan de monitoreo de la condición (MBC) aplicado paralelamente, fortalece el conocimiento del personal de operación y mantenimiento sobre el estado y condiciones de trabajo de los equipos.

Los equipos combinados de personal, podrán identificar aspectos y herramientas mediante las cuales tanto operadores como mantenedores puedan evitar, minimizar o detectar fallos antes de que ocurran.

Partiendo del análisis de criticidad de los equipos se plantea aplicar técnicas de TPM combinadas con MBC para el mantenimiento de los equipos de la presa. En la casa de máquinas se propone realizar actividades de MBC, TPM y RCM. En el caso del sistema de conducción se combinarán tareas del MBC y TPM mientras que en la subestación las tareas a realizar corresponden al MBC y RCM.

Las etapas planteadas para el desarrollo del modelo de gestión propuesto, están concebidas bajo la premisa del mejoramiento continuo tratando de alinear los objetivos de mantenimiento con los objetivos globales de la corporación; además constituyen una herramienta importante para la toma de decisiones.

El modelo de gestión planteado, el método de evaluación de la gestión de mantenimiento y los índices de medición propuestos reúnen los requisitos mínimos para seleccionar una herramienta informática administrar de manera eficiente la gestión de mantenimiento.

Bibliografía

- AENOR. (septiembre de 2008). UNE-EN-15341. *Mantenimiento, Indicadores clave de rendimiento de mantenimiento*. Madrid, España: AENOR.
- Amendola, L. J. (2010). *Gestión de Proyectos de Activos Industriales*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- Azadeh Kianfar, F. K. (2010). Plan function deployment via RCM and QFD. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 14.
- Enerjubones. (2010). Diseño definitivo Proyecto Minas San Francisco - Informe Hidráulico. Cuenca, Ecuador.
- Fernandez, F. J. (2004). *Auditoría de mantenimiento e indicadores de gestión*. Madrid: Fundación Confemetal.
- Garcia, O. (2013). *Confiabilidad Humana, Clave de la Competitividad Organizacional*. Bogotá: Ediciones Legis.
- Garrido, S. G. (2003). *Organización y Gestión Integral de Mantenimiento*. Madrid: Ediciones Díaz Santos S.A.
- Luis Navarro, A. C. (1997). *Gestión Integral de Mantenimiento*. Barcelona: marcombo.
- Mora, L. A. (2013). *MANTENIMIENTO Planeación, ejecución y control*. Mexico: Alfaomega Grupo Editor.
- Pablo Viveros, R. S. (2013). Propuesta de un modelo de gestión de mantenimiento y sus principales herramientas de apoyo. *Ingeniare, Revista chilena de ingeniería*, 14.
- Ron Moore, R. R. (1999). La Combinación de TPM y el RCM, estudio de un caso práctico. *Fiabilidad, Mantenibilidad y Mantenimiento proactivo*, 8.
- Shirose, K. (1994). *TPM para operarios*. Madrid: TGP Hoshin.
- Suzuki, T. (s.f.). *TPM en la industria de procesos*. Madrid: TGP, HOSHIN, S.L.

ANEXO 1

FORMATOS DE ENCUESTA PARA EL DIAGNÓSTICO DE LA GESTIÓN DE
MANTENIMIENTO EN LAS PRINCIPALES CENTRALES DE GENERACIÓN