

**Gestión de un plan de mantenimiento centrado en confiabilidad para una turbina  
tipo francis de eje vertical**

Luis Gabriel Ortiz Pérez

Trabajo de grado para optar el título de Especialista en Gerencia de Mantenimiento

Director:

Manuel De Jesús Martínez

M.I ingeniero Mecánico

Universidad Industrial De Santander  
Facultad De Ingeniería Físico Mecánicas  
Escuela De Ingeniería Mecánica  
Especialización En Gerencia De Mantenimiento  
Bucaramanga

2023

### **Agradecimientos**

A Dios y a la vida por permitirme cumplir un objetivo más en mi proyecto de vida, a la Universidad Industrial de Santander, personal administrativo y docentes por el conocimiento adquirido durante este proceso.

A mi madre por su apoyo incondicional, a mi padre que desde el cielo me sigue alentando, a mi hermano Oscar, a mi hijo Julián Andrés, a mi nieto Julián Alejandro y a Jessika por ser el pilar más importante de mi vida.

**Tabla de contenido**

|   | Pág. |
|---|------|
| Introducción .....  | 10   |
| 1. Marco Conceptual .....   | 12   |
| 1.1 Gestión Del Mantenimiento.....                                    | 12   |
| 1.2 Mantenimiento Centrado En Confiabilidad .....                     | 13   |
| 1.2.1 Selección del sistema y recolección de información. ....        | 15   |
| 1.2.2 Definición de los límites del sistema. ....                     | 16   |
| 1.2.3. Descripción del sistema y diagrama de bloques funcionales..... | 16   |
| 1.2.4. Modo de falla y análisis efectivo. ....                        | 16   |
| 1.2.5. Análisis del árbol de decisión lógica. ....                    | 17   |
| 1.2.6. Selección de tareas.....                                       | 17   |
| 1.2.7. Ventajas y logros de la aplicación del RCM.....                | 18   |
| 1.3 Análisis de modo de falla.....                                    | 18   |
| 1.4 Indicadores de Gestión.....                                       | 19   |
| 1.4.1 Indicadores de Mantenimiento.....                               | 20   |
| 1.4.1.1 Fiabilidad. ....  | 20   |
| 1.4.1.2 MTBF (Mean Time Between Failures).....                        | 20   |
| 1.4.1.3 MTTR (Mean Time To Repair). ....                              | 21   |
| 1.4.1.4 Disponibilidad.....   | 21   |
| 1.4.1.5 Costo. ....   | 21   |
| 2. Objetivos .....  | 23   |

|  |    |
|--|----|
| GESTIÓN DE UN PLAN DE MANTENIMIENTO                            | 4  |
| 2.1 Objetivo General: .....                                    | 23 |
| 2.2 Objetivos Específicos: .....                               | 23 |
| 3. Marco Teórico.....  | 24 |
| 3.1 Central Hidroeléctrica.....                                | 24 |
| 3.2 Funcionamiento de una Central Hidroeléctrica .....         | 24 |
| 3.3 Principales Componentes de una Central Hidroeléctrica..... | 25 |
| 3.3.1 Presa.....   | 25 |
| 3.3.2 Sistema de Conducción.....                               | 26 |
| 3.3.3 Casa de Válvulas.....                                    | 27 |
| 3.3.4 Casa de Máquinas .....                                   | 28 |
| 3.4 Turbinas Hidráulicas.....                                  | 29 |
| 3.4.1 Turbina Francis .....                                    | 30 |
| 3.4.1.1 Principales componentes de una Turbina Francis.....    | 32 |
| 4. Análisis de la información de mantenimiento .....           | 36 |
| 4.1 Histórico de fallas .....                                  | 36 |
| 4.2 Análisis de Criticidad.....                                | 42 |
| 4.3 Análisis de Modos y Efectos de Fallas (FMECA).....         | 44 |
| 4.3.1 Cojinete Guía .....                                      | 45 |
| 4.3.2 Generador.....   | 47 |
| 4.3.3 Regulador Hidráulico.....                                | 49 |
| 4.3.4 Planeación de mantenimiento preventivo y predictivo..... | 51 |
| 5. Conclusiones.....   | 56 |
| Referencias.....   | 58 |

**Lista de figuras**

|   | <b>Pág.</b> |
|---|-------------|
| Figura 1 Acciones posibles de realizar antes o después de la falla..... | 13          |
| Figura 2 Proceso RCM.....   | 15          |
| Figura 3 Análisis de Modos y Efectos de Falla (FMECA).....              | 19          |
| Figura 4 Vida de un Equipo.....   | 20          |
| Figura 5 Reparto preventivo-correctivo y límites.....                   | 22          |
| Figura 6 Esquema general del sistema de conducción.....                 | 27          |
| Figura 7 Esquema general de Casa de Válvulas.....                       | 28          |
| Figura 8 Esquema general de la casa de máquinas.....                    | 29          |
| Figura 9 Casa de Máquinas.....  | 31          |
| Figura 10 Datos técnicos.....   | 31          |
| Figura 11 Análisis porcentual de eventos en salida Unidad 1 (2021)..... | 37          |
| Figura 12 Descripción de eventos en salida Unidad 1 (2021).....         | 38          |
| Figura 13 Análisis porcentual de eventos en salida Unidad 1 (2022)..... | 39          |
| Figura 14 Descripción de eventos en salida Unidad 1 (2022).....         | 40          |
| Figura 15 Categoría de Severidad.....                                   | 41          |
| Figura 16 Niveles de Probabilidad.....                                  | 41          |
| Figura 17 Matriz de evaluación de riesgos.....                          | 42          |
| Figura 18 Análisis de Mejorabilidad.....                                | 44          |
| Figura 19 Cojinete Guía de Turbina.....                                 | 45          |

|   |    |
|---|----|
| Figura 20 Revisión planes de mantenimiento-confiabilidad cojinete guía. ....        | 46 |
| Figura 21 Generador. ....   | 47 |
| Figura 22 Revisión planes de mantenimiento-confiabilidad generador. ....            | 48 |
| Figura 23 Regulador Hidráulico. ....  | 49 |
| Figura 24 Revisión planes de mantenimiento-confiabilidad regulador hidráulico. .... | 50 |

**Lista de tablas**

|   | <b>Pag.</b> |
|---|-------------|
| Tabla 1 Análisis de criticidad. ....                          | 43          |
| Tabla 2 Planeación mantenimiento preventivo y predictivo..... | 51          |

## Resumen

**Título:** Gestión de un plan de mantenimiento centrado en confiabilidad para una turbina tipo francis de eje vertical\*

**Autor:** Luis Gabriel Ortiz Pérez\*

**Palabras Claves:** Mantenimiento, Confiabilidad, Disponibilidad, Modos De Falla, Turbinas Francis, Generador, Criticidad.

### Descripción:

Este documento contiene la metodología necesaria para la elaboración e implementación de un plan de mantenimiento basado en RCM para una turbina tipo francis de eje vertical ubicada en la central hidroeléctrica Palmas, haciendo especial énfasis en la descripción de las diferentes partes que componen una central, las mediciones y pruebas que están establecidas en el plan de mantenimiento desarrollado en la compañía, con el fin de mejorar la vida útil de los equipos.

Con esta investigación se pretende apoyar a las prácticas de mantenimiento que ya están implementadas con el fin de lograr detallar su operación y las posibles causas de fallas para alcanzar un nivel óptimo de disponibilidad y confiabilidad en las unidades de generación de energía eléctrica que permitan cumplir con los estándares requeridos en la industria.

Este trabajo permite tener un mayor conocimiento, tanto a los operadores como al personal encargado del mantenimiento, acerca de los modos de falla de los equipos, siguiendo los lineamientos de la norma SAE JA1012 y del mantenimiento centrado en confiabilidad.

---

\* Trabajo de grado

\*\* Facultad de Posgrados, Escuela De Ingeniería Mecánica, Director: Manuel De Jesús Martínez

## Abstract

**Title:** Management of a reliability centered maintenance plan for a vertical axis francis type turbine\*

**Autor:** Luis Gabriel Ortiz Perez\*\*

**Keywords:** Maintenance, Reliability, Availability, Failure Modes, Francis Turbine, Generator, Criticality.

### Description:

This document contains the necessary methodology for the preparation and implementation of a maintenance plan based on RCM for a vertical axis francis type turbine located at the hydroelectric power station Palmas, with special emphasis on the description of the different parts that make up a power plant, the measurements and tests that are established in the maintenance plan developed in the company, in order to improve the useful life of the equipment.

This research is intended to support the maintenance practices that are already implemented in order to detail their operation and the possible causes of failures to achieve an optimal level of availability and reliability in the electric power generation units that allow compliance with required industry standards.

This work allows to have a greater knowledge, both to the operators and to the personal in charge of maintenance, about the failure modes of the equipment, following the guidelines of the SAE JA1012 standard and maintenance centered on reliability.

---

\* Degree work

\*\* Postgraduate Faculty, School of Mechanical Engineering, Director: Manuel De Jesús Martínez

## Introducción

La política de calidad en la prestación del servicio implementada internamente por Essa para llegar a los más altos índices de favorabilidad y satisfacción en el usuario final requiere de un mantenimiento asertivo en sus negocios (generación, distribución y transmisión). Actualmente el mantenimiento es esencial en cualquier empresa, con éste se logra la conservación de los equipos, tanto su seguridad como su confiabilidad.

El área de generación de energía de Essa emplea diversas técnicas de mantenimiento en sus activos, no obstante, se requiere explorar un espectro más amplio de técnicas de mantenimiento y así poder definir e implementar aquellas que mejor apliquen a los activos críticos con el fin de mejorar sus indicadores y por consiguiente obtener mejores resultados en la gestión de mantenimiento.

Las buenas estrategias de mantenimiento empiezan con la definición de los requerimientos de cada una de las partes de los equipos en funcionamiento. Esto es debido a que la adecuada selección de una política de mantenimiento no se debe llevar a cabo de forma aleatoria.

Un insumo importante por obtener de las técnicas de mantenimiento es la información de las variables más relevantes de los activos, a través de las cuales se podrá conocer de primera mano el verdadero estado de cada equipo. Esta información contenida en los indicadores de gestión del mantenimiento permite enmarcar la efectividad del proceso.

El Mantenimiento Centrado en Confiabilidad RCM gracias a su estructura estratégica permite llevar a cabo la evaluación y selección de procesos que se pueden implementar de forma

rápida y segura. Además, mejora la confiabilidad de la operación y asegura la preservación de las funciones del activo.

Las últimas normas hechas por el ente regulador del sector eléctrico y las que se van a establecer en un futuro inmediato suponen que las pequeñas centrales hidroeléctricas entren a competir al mercado con las grandes centrales, esto conlleva a que el área de generación de energía de la compañía deba gestionar la implementación de una metodología de mantenimiento que brinde tanto disponibilidad como confiabilidad para poder estar a la altura de la demanda de energía eléctrica.

En este orden de ideas, para cumplir con las nuevas disposiciones en la generación de energía eléctrica la Planta Palmas de Essa debe poder demostrar que sus unidades de generación o turbinas poseen tanto disponibilidad como confiabilidad y reducir al máximo las paradas de planta no programadas por fallas, para poder competir con las Grandes centrales.

En busca de lograr este objetivo a nivel empresarial y en aras de continuar participando activamente dentro del mercado de energía eléctrica se plantea en este documento la Gestión de un Plan de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad para una turbina de dicha PCH, cabe anotar que los sistemas, componentes y partes son iguales para las cuatro turbinas instaladas en la planta.

## **1. Marco Conceptual**

### **1.1 Gestión Del Mantenimiento**

La función de mantenimiento depende del ciclo de vida de las máquinas en sus tres etapas: mantenimiento, reparación o sustitución. La gestión del mantenimiento se define como “La práctica administrativa dirigida hacia el logro del uso efectivo y eficiente de los recursos materiales, económicos, humanos, de tiempo e información disponibles para alcanzar los objetivos del mantenimiento” Mora (2009). Partiendo de esta definición, para que la gestión del mantenimiento sea eficiente se necesita implementar estrategias asertivas de mantenimiento con el fin de generar un marco de referencia que permita orientar la toma de decisiones y el actuar de todos y cada uno de los involucrados en el proceso.

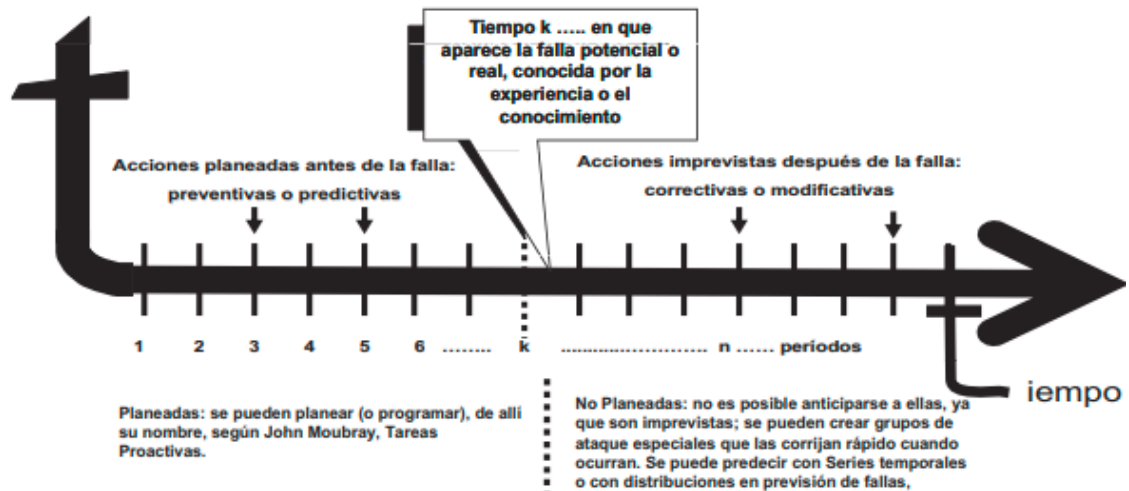
“La eficiencia con que la gestión de mantenimiento contribuye para alcanzar la producción total mediante la dotación de capacidades y la fiabilidad del parque industrial, se plasma al maximizar la disponibilidad de los equipos” (Rey, 1996)

Una vez visualizado todo el proceso y se hayan establecido las normas se deben definir los lineamientos sobre la manera de instrumentarse de las mismas, para esto se debe identificar dentro de los procesos de mantenimiento – planeado, correctivo, inspección.

La gestión de mantenimiento considera la planeación, organización, coordinación, dirección, ejecución y el control de todas y cada una de las actividades relacionadas con mantenimiento, con el fin de cumplir su misión.

La figura 1 muestra las posibles acciones a realizar antes (preventivas o predictivas) y después (correctivas o modificativas) de presentarse una falla.

**Figura 1** Acciones posibles de realizar antes o después de la falla.



Nota: Mantenimiento Planeación, ejecución y control (Mora, A. 2009)

## 1.2 Mantenimiento Centrado En Confiabilidad

El objetivo de las empresas siempre es la maximización de sus productos y la reducción de los recursos financieros, por lo tanto, proveer valor agregado determina realizar actividades con calidad, eficiencia y al menor costo posible. Bajo esta premisa deben estar disponibles siempre que sean requeridos, teniendo en cuenta el control de riesgos en seguridad y en el medio ambiente.

Dentro de esas nuevas técnicas de mantenimiento se encuentra el Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM), el cual constituye una de las principales y más efectivas herramientas para mejorar y optimizar el mantenimiento de las compañías.

El Mantenimiento Centrado en Confiabilidad - RCM (por sus siglas en inglés), empezó a desarrollarse en la industria de la aviación en la década de 1960, convirtiéndose en un pilar fundamental para la práctica de la gestión de mantenimiento.

El RCM se puede definir como “el proceso utilizado para determinar qué se debe hacer para asegurar que un activo físico continúe haciendo lo que queremos que haga en un contexto operacional dado” (Moubrey, 1999). El éxito de RCM se debe a que permite establecer las necesidades de los diversos equipos en su contexto operacional, haciendo énfasis en el impacto que pueden llegar a provocar las fallas de estos activos en el ambiente, en la operación y especialmente en la seguridad de los trabajadores involucrados.

El Mantenimiento Centrado en Confiabilidad sirve de guía para identificar las actividades de mantenimiento con sus respectivas fallas, frecuencias a los activos más importantes de un equipo y su eficacia radica en el análisis funcional de todos los activos de un contexto operacional hecho por el equipo de trabajo.

La norma establece que para que un método de mantenimiento se pueda catalogar como RCM debe resolver siete preguntas:

¿Cuáles son las funciones y los parámetros de funcionamiento de un activo en su contexto operacional?

¿De qué manera falla un activo cumpliendo dichas funciones?

¿Cuál es la causa de la falla?

¿Qué sucede cuando ocurre una falla?

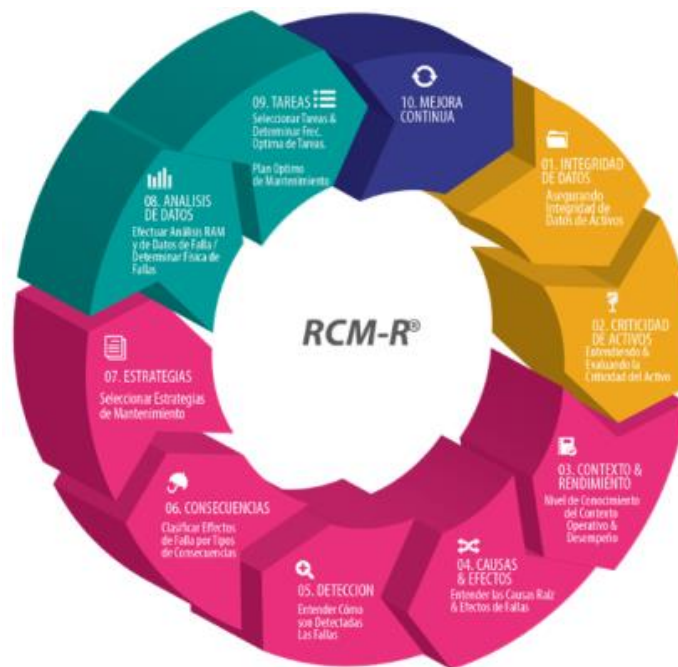
¿Cuál es la consecuencia de cada falla?

¿Qué puede hacerse para prevenir o predecir una falla?

¿Qué debe hacerse si no se encuentra una tarea preventiva o predictiva adecuada?

La figura 2 nos muestra el paso a paso a seguir para la implementación del RCM.

**Figura 2** *Proceso RCM*



Tomado de (Sifonte, 2017)

A través de estas preguntas surge un proceso sistemático que establece los requerimientos de mantenimiento en todos los activos fijos dentro de un contexto operativo. Las actividades de implementación del RCM se basan en estos pasos básicos para cada activo fijo:

### ***1.2.1 Selección del sistema y recolección de información.***

Basándose en los históricos, se hace la selección de los activos fijos, de acuerdo con los que tengan la mayor cantidad de mantenimientos correctivos, los que tengan un número elevado de mantenimientos preventivos, aquellos que han demandado un alto costo en los mantenimientos correctivos y que hayan generado paradas de planta, ya sea total o parcialmente.

### ***1.2.2 Definición de los límites del sistema.***

Para realizar la delimitación del sistema es necesario tener un conocimiento exacto de lo que se debe incluir o no en dicho sistema, con el fin de que no se deje por fuera ningún activo de relevancia.

Ésta incluye verificar todas las interfaces del sistema, tanto internas como externas, teniendo en cuenta todas las interacciones que establecen las entradas y salidas del sistema.

### ***1.2.3. Descripción del sistema y diagrama de bloques funcionales.***

Es necesario documentar todo lo revisado con anterioridad, para crear una línea base que será utilizada en la planificación de los mantenimientos.

Se debe describir el sistema, es decir, los datos recolectados en las etapas previas se documentan en el formato de análisis de sistemas. Esta información se usará como registro para las comparaciones posteriores.

Se grafica un diagrama de bloques funcional, el cual se ocupa de la relación estática y física existente en un sistema.

### ***1.2.4. Modo de falla y análisis efectivo.***

El modo de falla y análisis de efecto y criticidad (FMECA) y el RCM se han aplicado con eficiencia desde hace más de cuatro décadas en la industria de la aviación y la militar para el

desarrollo de programas de mantenimiento. De igual manera, se usa en forma primaria para analizar la fiabilidad y facilidad de mantenimiento.

“RCM aborda los requisitos de mantenimiento de equipos principalmente con un énfasis sobre las fallas funcionales y modos de fallas al mismo tiempo que en el contexto operativo. FMECA se lleva a fondo en el sistema y subsistemas para asegurar la identificación de todas las posibles fallas funcionales con modos de falla asociadas” (Vijay & Chaturvedi, 2011).

#### ***1.2.5. Análisis del árbol de decisión lógica.***

En este paso se reflejan los diversos modos de falla que se han encontrado y la forma de impacto que tienen en la planta. El esquema del análisis del árbol de decisión posee hasta 3 órdenes de prioridades, denotándolas con las letras A, B y C y combinaciones como D/A, D/B o D/C. En el esquema de prioridades las categorías denotadas con la letra A son superiores a las de la letra B y así sucesivamente, por lo tanto, cuando se hace la asignación de recursos se da prioridad a los que estén en la parte superior.

#### ***1.2.6. Selección de tareas.***

En este paso se asignan los recursos y tareas que se plasmarán en el plan de mantenimiento, por lo tanto, es la actividad más importante ya que se podrá obtener a partir de ésta la rentabilidad económica resultante de la implementación del RCM.

Las tareas seleccionadas deberán ser capaces de prevenir, detectar y eliminar las fallas, ya sean evidentes u ocultas.

### ***1.2.7. Ventajas y logros de la aplicación del RCM.***

Mejora de las comunicaciones entre el diferente personal de la compañía.

Aprovechamiento de la habilidad y el conocimiento de cada componente del grupo.

Realización de un mejor análisis de cada uno de los componentes del equipo.

Detección de fallas antes de que ocurran.

Mayor seguridad y protección del entorno.

Mejores rendimientos de los costes de mantenimiento.

Amplia base de datos de mantenimiento (históricos).

Mejor trabajo en grupo.

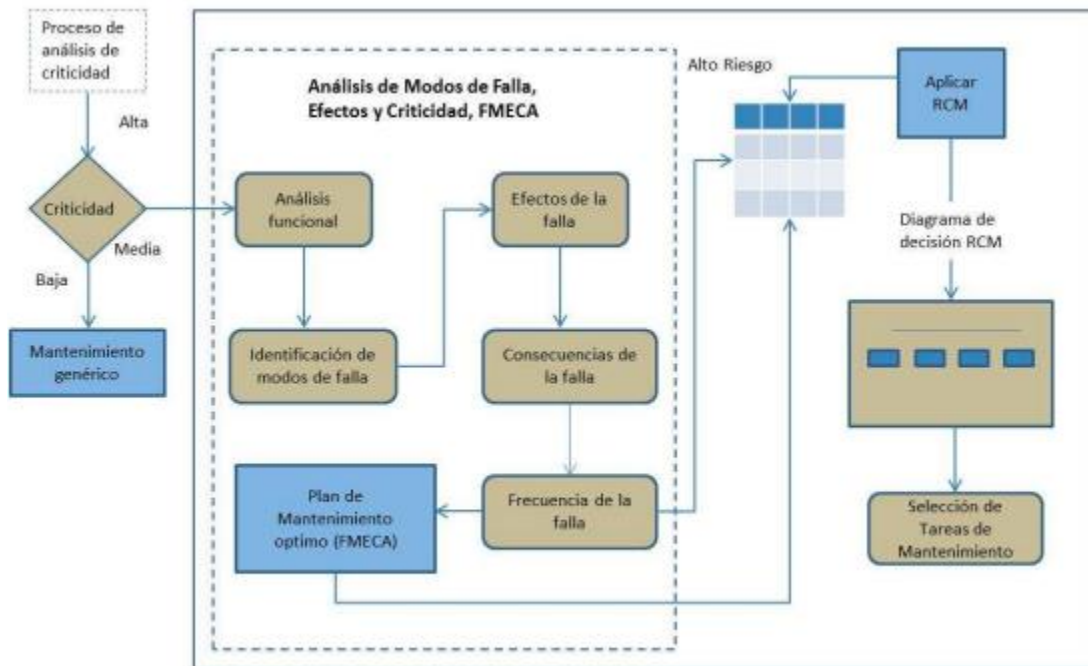
### **1.3 Análisis de modo de falla.**

De acuerdo con la norma SAE JA1011, el modo de falla es un evento que causa una falla funcional. Una de las metodologías más usadas para realizar el análisis de los diferentes modos de falla es el FMECA (Failure Mode, Effects and Criticality Analysis), su objetivo es desarrollar conocimiento acerca de los eventos de falla y orientar acciones para la eliminación de las causas de los modos de falla.

En el proceso de evaluación de los modos de falla se busca identificar las formas por las cuales un sistema o equipo puede perder funcionabilidad dentro del proceso, así mismo, sus efectos y consecuencias identificables considerando los tres criterios básicos del RCM: operaciones, seguridad y medio ambiente. (Ordoñez, 2016)

En la siguiente figura se presenta un diagrama de flujo propuesto por José Luis Ordoñez Flores para la ejecución del FMECA.

**Figura 3** *Análisis de Modos y Efectos de Falla (FMECA).*



Tomado de Propuesta de implementación del mantenimiento centrado en confiabilidad para optimización de los planes de mantenimiento en una central hidroeléctrica. (Ordoñez, J. 2016).

#### 1.4 Indicadores de Gestión.

Los indicadores de mantenimiento tienen gran relevancia en la gestión de mantenimiento porque su análisis tiene como objetivo evidenciar el control del proceso de mantenimiento.

Estos indicadores no tienen una similitud de utilización.

Los principales indicadores de mantenimiento se muestran en la siguiente figura:

**Figura 4** *Vida de un Equipo.*

Tomado de Auditoría del Mantenimiento e Indicadores de Gestión. (González, 2010).

### 1.4.1 Indicadores de Mantenimiento

**1.4.1.1 Fiabilidad.** Medida como la media de los tiempos de buen funcionamiento, está íntimamente relacionada con la media de tiempo para revisar o reparar.

$$R(t) = e^{-Tasa\ de\ fallas * tiempo} \quad (1)$$

**1.4.1.2 MTBF (Mean Time Between Failures).** Se debe extender a la media entre paradas, ya sean preventivas o correctivas.

$$MTBF = \frac{Horas\ Operadas}{Número\ de\ Paradas} \quad (2)$$

**1.4.1.3 MTTR (Mean Time To Repair).** Es el tiempo promedio de los equipos expresado en horas, es un indicador que cuantifica el tiempo de las reparaciones, es decir, su rapidez o lentitud.

$$MTTR = \frac{\text{Total Tiempo de Paradas}}{\text{Número de Paradas}} \quad ( 3 )$$

**1.4.1.4 Disponibilidad.** Es la probabilidad de que el equipo funcione satisfactoriamente en el momento en que sea requerido después del comienzo de su operación, cuando es usado en condiciones estables.

Es el porcentaje de tiempo que el equipo esta útil para producción. El tiempo que está fuera de servicio o indisponible contempla toda parada por mantenimiento correctivo o preventivo, desde el preciso instante en que queda fuera de servicio hasta que se entrega el equipo ya operativo.

$$\text{Disponibilidad} = \frac{\text{Tiempo Total} - \text{Tiempo fuera de servicio}}{\text{Tiempo Total}} \quad ( 4 )$$

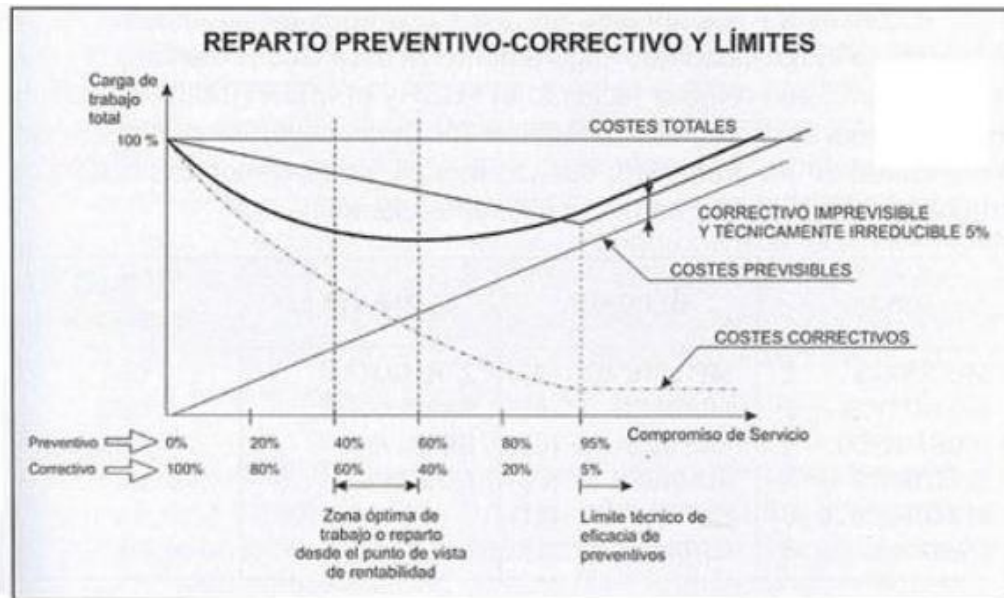
También se puede representar de la siguiente manera:

$$D = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad ( 5 )$$

**1.4.1.5 Costo.** La fiabilidad y la disponibilidad son los dos indicadores técnicos básicos de cualquier departamento de mantenimiento, independiente de la forma en la cual los medimos debido a la interrelación de cada una de sus variables (MTBF, MTTR y D), pero a éstas hay que añadirles el costo. Se debe conocer cuánto le está costando a la compañía un determinado nivel de servicio. De igual manera, se debe tener el conocimiento de qué parte de nuestra actividad en costo se dedica a las intervenciones de carácter preventivo y qué parte a las de carácter correctivo.

En la siguiente figura se expone el equilibrio entre los dos tipos de mantenimiento posible, los indicadores de costos y el porcentaje de cada mantenimiento en que se encuentra.

**Figura 5** *Reparto preventivo-correctivo y límites.*



Tomado de Auditoría del Mantenimiento e Indicadores de Gestión. (González, 2010).

En un escenario ideal se debería conocer qué cuesta reducir las fallas aumentando el mantenimiento preventivo y viceversa, pero esto no es fácil en lo absoluto. Frecuentemente la reducción de fallas se consigue modificando el sistema.

Según Francisco Javier González, (2010) en general se realizan demasiados mantenimientos preventivos, por lo tanto, es usual el hecho de que, dejar de hacer determinadas operaciones sistemáticas implica el ahorro de costos asociados a las mismas (mano de obra, repuestos e indisponibilidad) pero no suele implicar aumento en el número de fallas ni tienen una relación directa con el envejecimiento y pérdida de vida útil del sistema.

El seguimiento de las fallas en un sistema es un indicador de la fiabilidad que se deberá estar controlando y del que se puede obtener con facilidad el MTBF y el MTTR.

## 2. Objetivos

### 2.1 Objetivo General:

Mejorar la disponibilidad y confiabilidad de una turbina tipo Francis de eje vertical con potencia nominal de 4.5 MWH de la Central Hidroeléctrica Palmas de Essa, desarrollando un modelo de mantenimiento centrado en confiabilidad RCM.

### 2.2 Objetivos Específicos:

Identificar todas las partes y componentes que conforman la turbina, las cuales se encuentran dentro de las fronteras en las que se aplicará la metodología RCM.

Realizar el análisis de modo de falla de la turbina y de sus partes, así como los efectos que causan estas fallas.

Aplicar el formato de decisión de la metodología RCM para asignar las tareas adecuadas dependiendo del modo de falla.

Desarrollar una estrategia de mantenimiento centrado en confiabilidad para la turbina y sus principales componentes.

### **3. Marco Teórico**

#### **3.1 Central Hidroeléctrica**

Una central hidroeléctrica es un sistema que genera electricidad mediante el aprovechamiento de la energía potencial del agua embalsada en una represa situada a más alto nivel que la central. El agua es conducida mediante una tubería de descarga a la sala de máquinas de la central, donde mediante enormes turbinas hidráulicas se produce la generación de energía eléctrica.

La función de una central hidroeléctrica es utilizar la energía potencial o estática de agua almacenada y convertirla, primero en energía mecánica al hacer girar la turbina y luego en eléctrica cuando la turbina acciona un alternador cuya rotación produce una corriente de electrones.

Las hay de dos tipos: de pasada (que aprovechan la energía cinética natural del agua corriente de los ríos) y de embalse (el agua se acumula mediante represas y luego se libera con mayor presión hacia la central). En el caso de la CH Palmas de Essa se utiliza tipo embalse.

#### **3.2 Funcionamiento de una Central Hidroeléctrica**

La presa situada aguas arriba del río acumula un volumen de agua para formar un embalse, esto permite que el agua adquiera una energía potencial que después se transforma en energía eléctrica. El agua captada en la presa es transportada por medio de una tubería forzada hasta la

turbina ubicada en la casa de máquinas de la CH, previo paso por casa de válvulas donde se controla la entrada de agua.

El agua de la tubería forzada va transformando su energía potencial en energía cinética, al llegar a la casa de máquinas el agua actúa sobre los álabes de la turbina, transformando de este modo su energía cinética en energía mecánica de rotación. El eje de la turbina (vertical en este caso), está unido al generador que al girar convierte la energía mecánica de rotación en tensión alterna de media, luego por medio de transformadores ubicados en la subestación eléctrica de la central es convertida en tensión alterna de alta para luego ser distribuida mediante líneas de transmisión a través de las redes del sistema interconectado local.

El recurso hídrico es restituido al río aguas abajo de la central hidroeléctrica por medio de un canal de hormigón o socaz después de haber cedido su energía.

### **3.3 Principales Componentes de una Central Hidroeléctrica**

#### ***3.3.1 Presa***

La presa tiene como función represar el agua para aumentar su nivel obligándolo a entrar a un canal de derivación. Está conformada por las siguientes partes:

**Dique Transversal:** Es una construcción que consta de una compuerta basculante y cuatro compuertas de fondo, su función es mantener el nivel del embalse.

**Sistema de Limpieza de agua útil:** Está compuesto por las rejillas, los rastrillos, el tanque desarenador, el compresor de aire y la grúa. Su función es la de evitar la entrada de cuerpos extraños al túnel.

Sistema de control de nivel: Está compuesto por dos sensores ultrasónicos y un PLC. Su función es la de controlar variaciones en el nivel de agua de la represa.

Sistema eléctrico: Sistema encargado de alimentar los circuitos de la represa.

### ***3.3.2 Sistema de Conducción***

Encargado de transportar el agua desde la represa hasta la casa de máquinas. Está compuesto por:

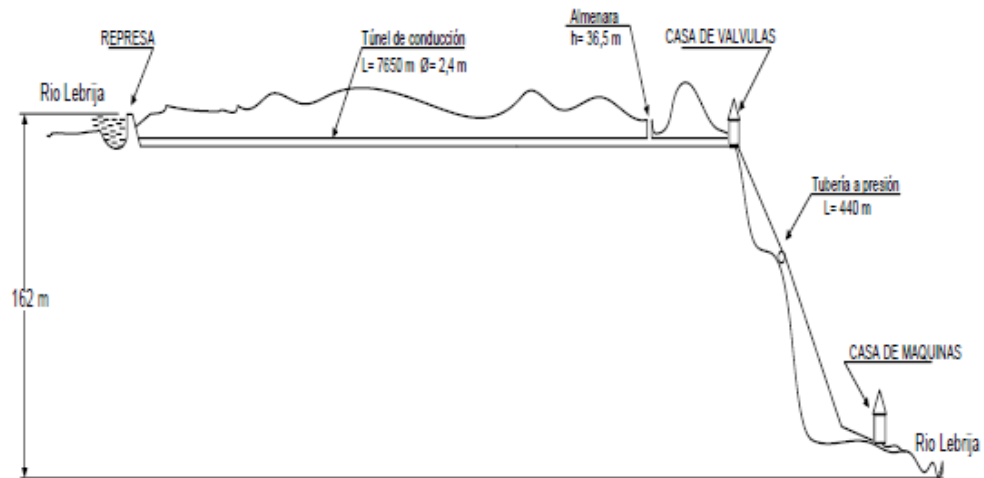
Túnel: Conducto cerrado cuyo diámetro varía de 2 a 3 m y de 7.650 m de longitud. Su función es transportar el agua desde la represa hasta la tubería de presión.

Almenara: Pozo de 36,2 m de altura y 4 m de diámetro, el cual amortigua las sobrepresiones del agua.

Casa de Válvulas: Es donde se encuentran las válvulas de operación y protección de las tuberías de presión (válvulas mariposa, válvulas de aireación y bypass).

Tubería a presión: está compuesta por dos tubos de acero de 1.3 y 1.5 m de diámetro respectivamente y 440 m de longitud. Su función es transportar el agua del túnel a la turbina.

A continuación, se puede apreciar (figura 6) el esquema general del sistema de conducción del agua desde la represa de Bocas hasta la casa de máquinas de la planta Palmas.

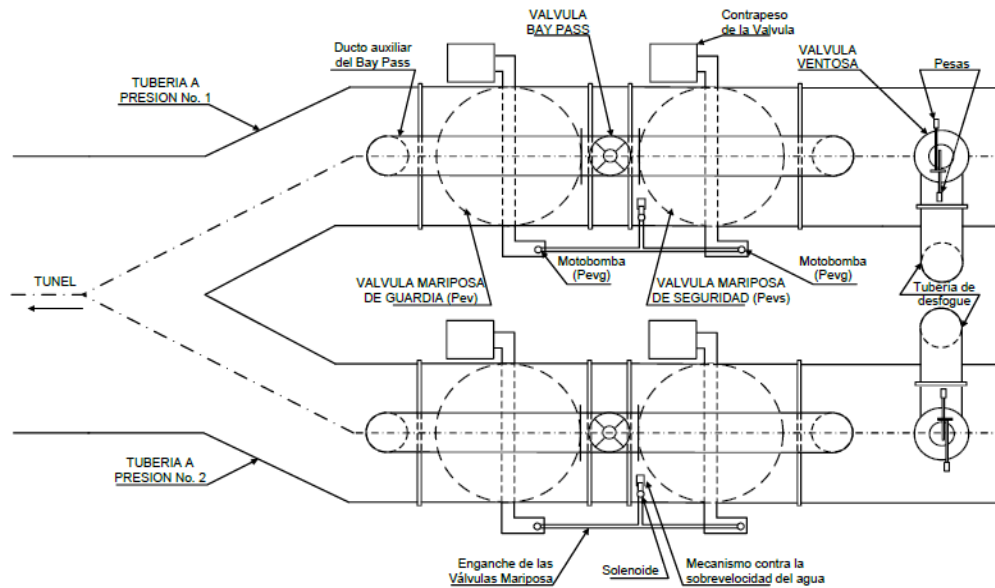
**Figura 6** Esquema general del sistema de conducción.

Tomado de Manual de Operación Planta Palmas Essa.

### 3.3.3 Casa de Válvulas

Es el sitio donde se presenta la división del túnel en dos tuberías de presión, además, se encuentran las válvulas destinadas para la operación, mantenimiento y protección de dichas tuberías, que tienen por objeto permitir o cortar el flujo del agua cada vez que sea necesario.

En la figura 7 se observa el esquema general de la casa de válvulas y las partes que la componen.

**Figura 7** Esquema general de Casa de Válvulas.

Tomado de Manual de Operación Planta Palmas Essa.

### 3.3.4 Casa de Máquinas

Es la construcción en donde se ubican las máquinas (turbinas y generadores) y los elementos de regulación y comando. Este tipo de casa de máquinas se construye alejada de la represa. El agua llega por medio de una tubería de presión desde la toma, por lo regular alejada de la central, y en el trayecto suele haber una chimenea de equilibrio. Está compuesto por:

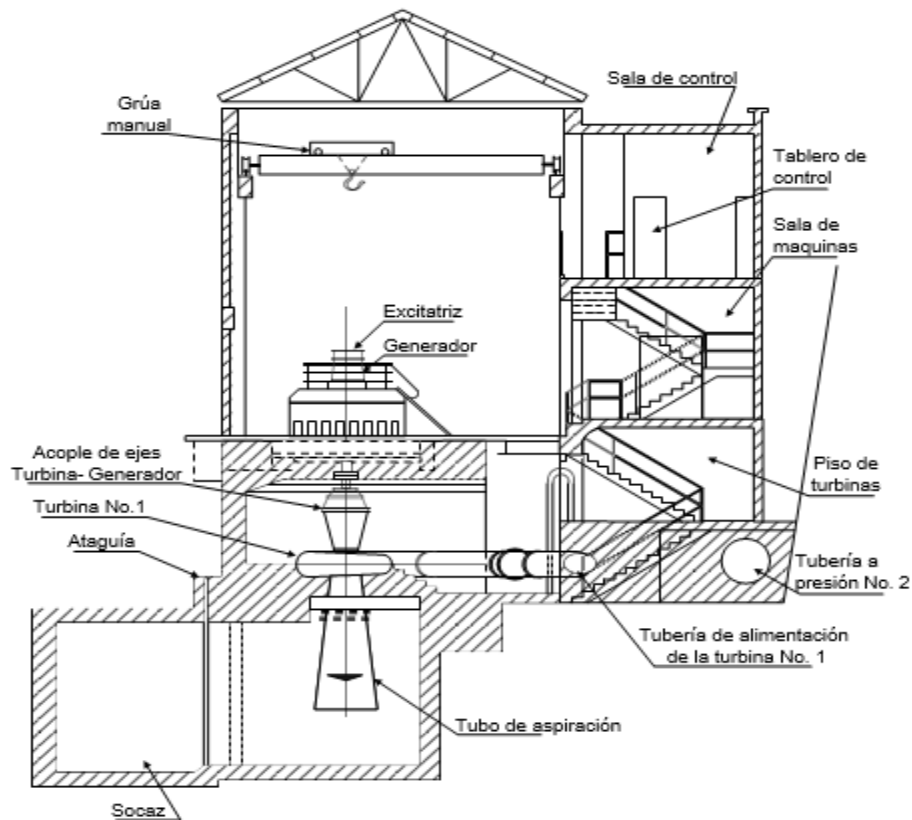
**Válvula Esférica y Válvula de Alivio:** Su función es la de controlar el paso de agua a la turbina y evitar el golpe de ariete durante la puesta en marcha o parada.

**Turbina y Generador:** Sistema encargado de transformar la energía hidráulica en energía eléctrica en forma de corriente alterna.

**Planta de emergencia:** Su función es alimentar los circuitos de la planta cuando se presenta un aumento o caída de voltaje y por falla o inversión de una fase.

La siguiente figura muestra el esquema general de la casa de máquinas.

**Figura 8** Esquema general de la casa de máquinas.



Tomado de Manual de Operación Planta Palmas Essa

### 3.4 Turbinas Hidráulicas

Máquinas destinadas a transformar la energía hidráulica de una corriente o salto de agua en energía mecánica. Por lo tanto, convierte la energía del agua, manifestada en su forma de presión (energía potencial o de posición) como en la de velocidad (energía cinética), en trabajo mecánico existente en un eje de rotación.

La aplicación inmediata del trabajo mecánico desarrollado en la turbina es la de hacer girar al rotor del generador de energía eléctrica, en el cual se realiza la transformación de la energía mecánica en energía eléctrica.

Todo esto es debido a que los ejes de la turbina y el generador están rígidamente unidos, formando un eje único con el que se obtiene un sincronismo de giro, es decir, idéntico número de revoluciones durante espacios de tiempo iguales.

Existen tres tipos de turbinas hidráulicas: Turbina Pelton, Turbina Kaplan y Turbina Francis, ésta última es la de nuestro interés ya que la planta Palmas posee cuatro de estas unidades.

### ***3.4.1 Turbina Francis***

La turbina Francis es conocida también como turbina de sobrepresión por ser variable la presión en las zonas del rodete o de admisión total, ya que éste se encuentra sometido a la influencia directa del agua en toda su periferia. Pueden ser instaladas con el eje en posición horizontal o vertical, siendo esta última disposición la más generalizada por estar ampliamente experimentada, especialmente en el caso de unidades de gran potencia.

En la siguiente imagen se aprecia la casa de máquinas de la planta Palmas.

**Figura 9** Casa de Máquinas.

Tomado de Manual de Operación Planta Palmas Essa.

**Figura 10** Datos técnicos

#### DATOS TÉCNICOS DE LAS TURBINAS

|                     |                       |
|---------------------|-----------------------|
| <b>TIPO:</b>        | FRANCIS VERTICAL      |
| <b>POTENCIA:</b>    | 6.500 CV nominal      |
| <b>CABEZA NETA:</b> | 130 m                 |
| <b>CAUDAL:</b>      | 3,5 m <sup>3</sup> /s |
| <b>VELOCIDAD:</b>   | 720 rpm               |
| <b>FABRICANTE:</b>  | CHARMILLES            |

#### DATOS TÉCNICOS DE LAS EXCITADORAS

|                    | UNIDADES 1 Y 2 | UNIDADES 3 Y 4 |
|--------------------|----------------|----------------|
| <b>TIPO:</b>       | PRINCIPAL      | PRINCIPAL      |
| <b>POTENCIA:</b>   | 32 kW          | 38 kW          |
| <b>VELOCIDAD:</b>  | 720 rpm        | 720 rpm        |
| <b>VOLTAJE:</b>    | 100 V          | 115 V          |
| <b>CORRIENTE:</b>  | 320 A          | 330 A          |
| <b>FABRICANTE:</b> | SECHERON       | SECHERON       |

### **3.4.1.1 Principales componentes de una Turbina Francis**

**3.4.1.1.1 Cámara Espiral o Caracol.** Está constituida por la unión sucesiva de una serie de anillos troncocónicos, cuyos ejes respectivos forman una espiral. Desde el acoplamiento con la tubería forzada, donde el diámetro interior del anillo correspondiente alcanza su valor máximo, la sección interior, circular en la mayoría de los casos, va decreciendo paulatinamente hasta el anillo que realiza el cierre de la cámara sobre sí mismo, cuyo diámetro interior se reduce considerablemente. Esta disposición se conoce como el caracol de la turbina, en el que, debido a su diseño, se consigue que el agua circule con velocidad aparentemente constante y sin formar torbellinos, evitándose pérdidas de carga.

**3.4.1.1.2 Distribuidor.** El distribuidor está formado por un grupo de palas móviles, cuyo conjunto constituye un anillo, cuya función es la de distribuir, y regular o cortar totalmente, el caudal de agua que fluye hacia el rodete.

**3.4.1.1.3 Rodete.** Se trata de la pieza fundamental donde se obtiene la energía mecánica deseada. Está unido rígidamente a la parte inferior del eje de la turbina, en situación perfectamente concéntrica con el distribuidor, ocupando el espacio circular que éste delimita. Consta de un núcleo central, alrededor del cual se encuentra dispuesto un número determinado de palas de superficie alabeada, aproximadamente entre 12 y 21, equidistantemente repartidas y solidarias al mismo, formando pieza única en bloque por fundición o soldadura, es decir, sin uniones ni fijaciones accesorias.

**3.4.1.1.3 Tubo de aspiración.** También llamado difusor. Es una conducción, normalmente acodada, que une la turbina propiamente dicha con el canal de desagüe. Tiene como misión recuperar al máximo la energía cinética del agua a la salida del rodete o, dicho de otra forma, aprovechar el salto existente entre la superficie libre del agua y la salida del rodete.

**3.4.1.1.4 Eje.** El eje de un turbo grupo tiene ciertas peculiaridades cuando se encuentra instalado en posición vertical. Por medio del eje de turbina, al estar rígidamente unido mediante acoplamiento al eje del alternador, se transmite al rotor de éste el movimiento de rotación necesario. Ahora bien, en este tipo de turbinas es en la zona de eje correspondiente al alternador donde se suele disponer el medio para soportar todo el peso del conjunto, formado por ejes, rotor, rodete y empuje del agua sobre los álabes de este último.

**3.4.1.1.5 Equipo de sellado del eje.** Como su nombre lo indica, está destinado a impedir el paso de agua que pudiera fluir desde el rodete hacia el exterior de la turbina, por el espacio existente entre la tapa de ésta y el eje. En esencia consta de una serie de aros formados por juntas, bien sean de carbón, de material sintético o grafitadas, etc., presionadas sobre un casquillo o collarín solidario con el eje, por medio de muelles de acero inoxidable o servomecanismos convenientemente distribuidos alrededor de la periferia de éste. Se conoce como junta del eje o junta de carbones.

**3.4.1.1.6 Cojinete guía.** Está situado lo más cerca posible del rodete, sobre la tapa superior de turbina, inmediatamente por encima del cierre estanco o sellado del eje. Consta de un anillo dividido radialmente en dos mitades o bien de una serie de segmentos, que asientan con perfecto ajuste sobre el eje. Las superficies en contacto con éste están recubiertas de metal blanco,

antifricción y suelen tener tallados, vertical o diagonalmente, unos canales sobre la superficie de contacto con el eje, para favorecer la circulación de aceite y así lograr su auto lubricación.

**3.4.1.1.7 Cojinete de empuje.** Este elemento, conocido también como soporte de suspensión, pivote, rangua o quicio, característico y necesario en todos los grupos de eje vertical, hemos de considerarlo como un componente propio de dichos grupos en sí y no de las turbinas hidráulicas que responden a tales condiciones de instalación.

**3.4.1.1.8 Freno.** Dispositivo de bandas que actúan sobre un volante para lograr la parada completa de la unidad cuando ésta alcanza los 200 rpm. Es accionado por presión de aceite con un mando manual.

**3.4.1.1.9 Regulador.** Es un dispositivo electromecánico que trabaja de forma automática o manual bajo presión de aceite. Es el encargado de poner o de retirar de funcionamiento la unidad, actuando sobre las válvulas de control para su operación, además de regular la potencia hidráulica suministrada a la turbina por medio de los brazos del distribuidor o palancas de fink que actúan sobre los álabes del distribuidor dependiendo de una señal suministrada por los terminales del generador.

**3.4.1.1.10 Rotor.** Cuenta con diez polos salientes, encargados de crear el campo para inducir una tensión en el estator. Este campo se crea al cerrar el circuito de excitación con las bobinas del rotor, siendo constante, pero por la velocidad del eje transmitida por la turbina se encuentran las condiciones necesarias para inducir una tensión en el estator del generador.

**3.4.1.1.11 Estator.** Es una corona dentada que tiene alojadas entre sus ranuras las bobinas de inducción que aprovechan el campo variable creado por la velocidad del rotor y su excitación para inducir una tensión en sus bobinas.

**3.4.1.1.12 Válvula bypass de la válvula esférica.** Es una válvula con un mando hidráulico cuya función principal es llenar de agua el caracol de la turbina para evitar el golpe brusco de ésta sobre los álabes del distribuidor al ser abierta la válvula esférica y así mismo, igualar las presiones de agua a cada lado de la válvula esférica para facilitar su apertura.

**3.4.1.1.13 RTD del cojinete guía.** Su función es censar la temperatura y enviar una señal al controlador-indicador que opera sobre la electroválvula Rev, la cual depresiona el circuito de aceite hacia la válvula esférica y el regulador cuando la temperatura del cojinete sobrepasa su rango normal.

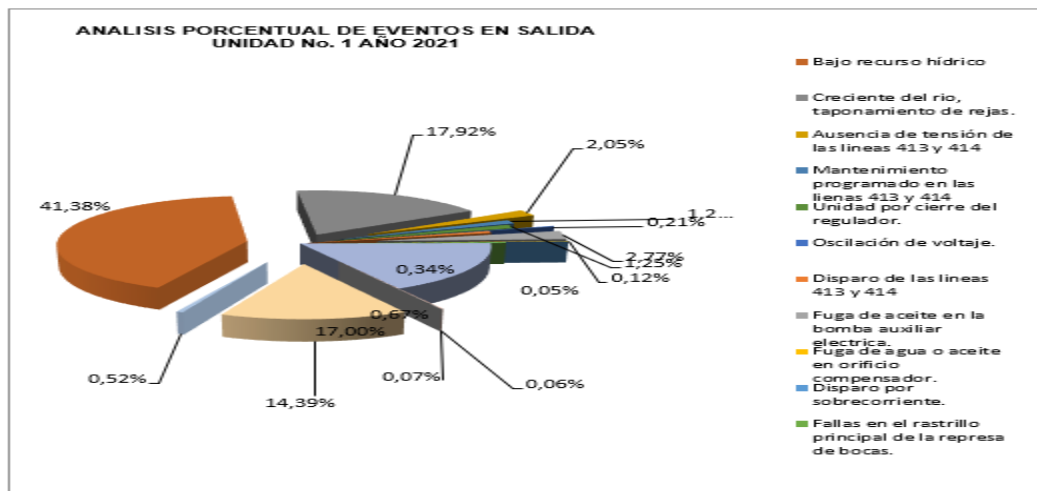
#### **4. Análisis de la información de mantenimiento**

La compilación de los datos de un equipo tales como la marca, el modelo, el proveedor, así como las intervenciones o mantenimientos que ha tenido dicho equipo, nos permite realizar una mejor gestión de mantenimiento sobre el activo.

La documentación de las fallas, la actividad realizada para dar solución, las partes o repuestos usados durante esta labor, nos permiten resolver problemas con mayor eficacia en el caso que se presenten nuevamente, así mismo, nos permite establecer métodos de detección de fallas, procedimientos de ajuste y reparación, con el fin de evitar que vuelva a suceder. Si se requiere hacer una modificación del activo, también debe quedar documentada.

##### **4.1 Histórico de fallas**

El área de generación de energía de Essa recopila la información de las paradas de planta, salidas de la unidad y demás eventos en las siguientes gráficas y tablas:

**Figura 11** Análisis porcentual de eventos en salida Unidad 1 (2021).

Tomado de Área de generación de energía Essa.

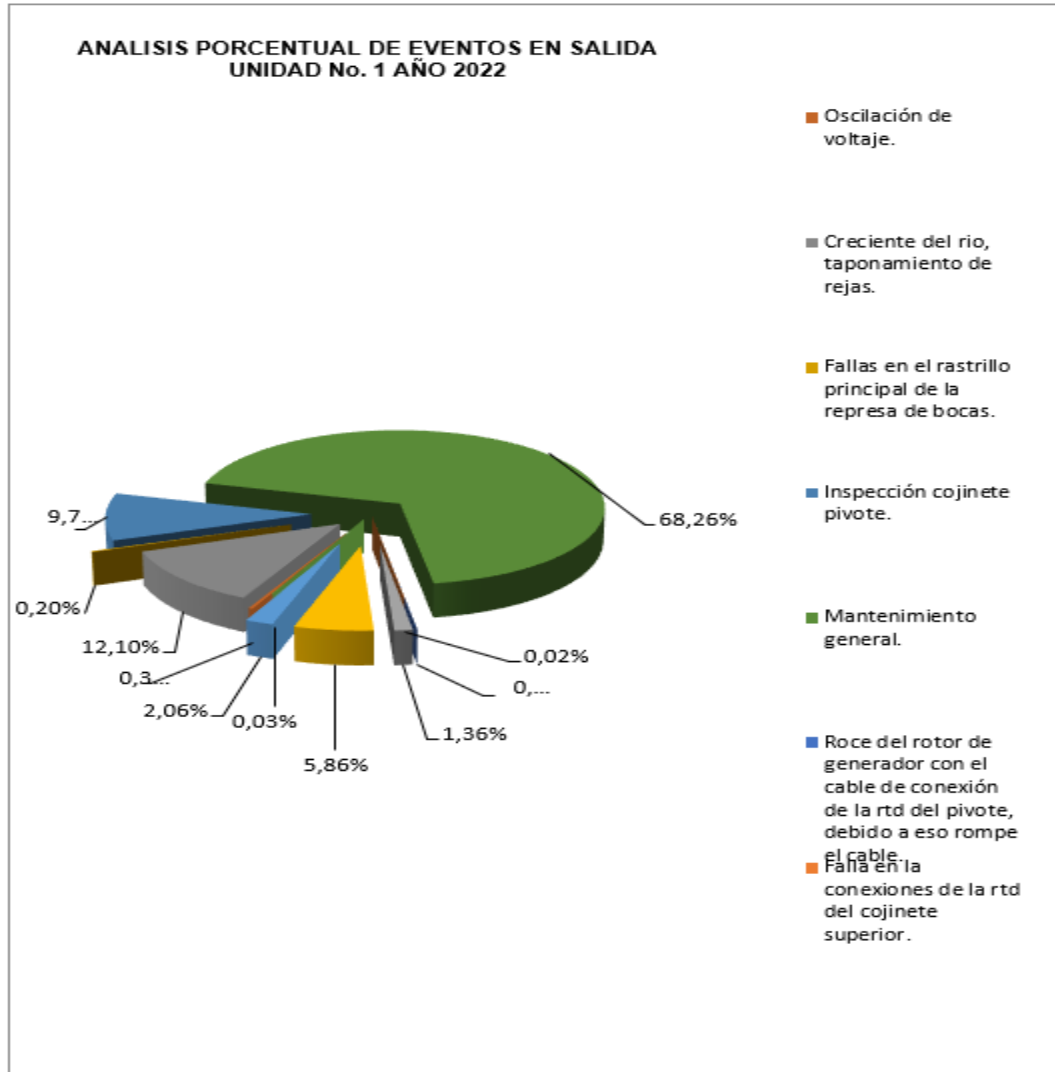
En esta gráfica se puede observar que el evento que produjo mayor índice de indisponibilidad en la planta de palmas fue el bajo recurso hídrico, debido a las condiciones climáticas que se presentaron, en su mayoría de sequía. En segundo lugar, se aprecia que el evento de crecientes en los ríos produce taponamiento de las rejillas, tanto en la principal como del tanque desarenador. Esto sucede a causa de que el vaso de la represa se encontraba lleno de sedimentación, ya que, por motivos ajenos a la empresa, no se pudieron realizar los desembalses requeridos para proceder con una limpieza eficaz en la represa de bocas. En tercer lugar, la gráfica nos muestra que se presentó el evento de la ausencia de tensión en las líneas 413 y 414, esto ocurrió por motivos fortuitos. Los demás eventos que generaron indisponibilidad en la unidad de generación No. 1 están discriminados en la gráfica, al igual que la ausencia de tensión en las líneas son fortuitos y no representaron mayor cantidad de tiempo disponible perdido.

Se muestra este análisis porcentual sintetizado en la siguiente tabla, donde se incluye la parada de planta por los desembalses controlados y programados, previa autorización de la CDMB.

**Figura 12** Descripción de eventos en salida Unidad 1 (2021).

| DESCRIPCION DEL EVENTO                                     | COMPONENTE INVOLUCRADA Y SU CLASIFICACION |         | HORAS          |
|--|---|---------|----------------|
|  | INTERNA                                   | EXTERNA |                |
| Bajo recurso hídrico                                       |   | 1       | 821,13         |
| Creciente del río, taponamiento de rejillas.               | 3   |         | 355,57         |
| Ausencia de tensión de las líneas 413 y 414                |   | 13      | 40,58          |
| Mantenimiento programado en las líneas 413 y 414           |   | 13      | 23,88          |
| Unidad por cierre del regulador.                           | 8   |         | 24,78          |
| Oscilación de voltaje.                                     |   | 13      | 4,25           |
| Disparo de las líneas 413 y 414                            |   | 13      | 13,32          |
| Fuga de aceite en la bomba auxiliar eléctrica.             | 10  |         | 55,03          |
| Fuga de agua o aceite en orificio compensador.             | 8   |         | 2,35           |
| Disparo por sobre corriente.                               |   | 13      | 0,90           |
| Fallas en el rastrillo principal de la represa de bocas.   | 10  |         | 6,77           |
| Desembalse programado.                                     | 3   |         | 337,28         |
| Apertura del orificio compensador.                         | 8   |         | 1,48           |
| Alta temperatura del pivote.                               | 8   |         | 1,20           |
| Fuertes vibraciones en el puente intermedio del generador. | 9   |         | 285,53         |
| Alta temperatura en la fase s del generador.               | 9   |         | 10,30          |
|  |   |         |                |
| <b>TOTAL</b>   |   |         | <b>1984,37</b> |

Tomado de Área de generación de energía Essa.

**Figura 13** Análisis porcentual de eventos en salida Unidad 1 (2022).

Tomado de Área de generación de energía Essa.

En la gráfica se observa que la unidad estuvo indisponible en gran cantidad de tiempo por mantenimiento mayor, al haber cumplido las 14000 horas de trabajo estipuladas. En segundo lugar, se aprecia que el evento de creciente de los ríos afectó en gran cantidad de tiempo la disponibilidad de la unidad, debido al fenómeno de la niña. En tercer lugar, se presentaron fallas recurrentes en el cojinete de empuje o pivote. Los demás eventos que muestra la gráfica fueron fortuitos.

Se muestra este análisis porcentual sintetizado en la siguiente tabla, donde se incluye la parada de planta por los desembalses controlados y programados, previa autorización de la CDMB.

**Figura 14** Descripción de eventos en salida Unidad 1 (2022).

| DESCRIPCION DEL EVENTO  | COMPONENTE INVOLUCRADA Y SU CLASIFICACION |         | HORAS          |
|---|---|---------|----------------|
|   | INTERNA                                   | EXTERNA |                |
| Oscilación de voltaje.  |   | 14      | 22,43          |
| Creciente del rio, taponamiento de rejjas.  | 3   |         | 814,88         |
| Fallas en el rastrillo principal de la represa de bocas.  | 10  |         | 13,42          |
| Inspección cojinete pivote.   | 8   |         | 658,10         |
| Mantenimiento general.  | 8   |         | 4597,32        |
| Roce del rotor de generador con el cable de conexión de la RTD del pivote, debido a eso rompe el cable. | 9   |         | 0,88           |
| Falla en la conexión de la RTD del cojinete superior.   | 9   |         | 1,57           |
| Cierre del regulador.   | 8   |         | 91,33          |
| Desembalse programado en la represa de bocas  | 3   |         | 394,67         |
| Parada unidad por instalación de la válvula esférica de la u-2  | 8   |         | 138,67         |
| Alta temperatura del cojinete de empuje.  | 8   |         | 1,73           |
|   |   |         |                |
| <b>TOTAL</b>  |   |         | <b>6735,00</b> |

Tomado de Área de generación de energía Essa.

De acuerdo con la norma SAE JA1012, se deben tener en cuenta las siguientes tablas publicadas en el documento del Departamento de Defensa de Estados Unidos, denominado MIL-STD-882E.

**Figura 15** *Categoría de Severidad.*

| CATEGORÍA DE SEVERIDAD |                        |   |
|------------------------|------------------------|---|
| Descripción            | Categoría de Severidad | Criterios de Resultado de Accidente   |
| Catastrófico           | 1                      | Podría resultar en uno o más de los siguientes: Muerte, invalidez total permanente, impacto ambiental significativo o irreversible, o pérdida monetaria igual o superior a \$10M.   |
| Crítico                | 2                      | Podría resultar en uno o más de los siguientes: lesiones por incapacidad permanente o enfermedad ocupacional que pueden resultar en la hospitalización de al menos tres miembros del personal, impacto ambiental significativo reversible, o pérdida monetaria igual o superior a \$1M pero inferior a \$10M. |
| Marginal               | 3                      | Podría resultar en uno o más de los siguientes: lesión o enfermedad ocupacional que resulte en uno o más días de trabajo perdidos, impacto ambiental moderado reversible, o pérdida monetaria igual o superior a \$100K pero inferior a \$1M.   |
| Despreciable           | 4                      | Podría resultar en uno o más de los siguientes: lesión o enfermedad ocupacional que no resulte en un día de trabajo perdido, impacto ambiental mínimo, o pérdida monetaria inferior a \$100K.   |

Tomado de MIL-STD-882E Práctica estándar para la seguridad del sistema (Departamento de Defensa de EEUU, 2012)

**Figura 16** *Niveles de Probabilidad.*

| NIVELES DE PROBABILIDAD |       |   |   |
|-------------------------|-------|---|---|
| Descripción             | Nivel | Item Individual Especifico  | Flota o Inventario  |
| Frecuente               | A     | Probable que ocurra a menudo en la vida de un item.   | Continuamente experimentada.  |
| Probable                | B     | Ocurrirá varias veces en la vida de un item.  | Ocurrirá con frecuencia.  |
| Ocasional               | C     | Probable de que ocurra en algún momento de la vida de un item.  | Ocurrirá varias veces.  |
| Remoto                  | D     | Poco probable, pero posible que ocurra en la vida de un item.   | Poco probable, pero razonablemente se puede esperar que ocurra.   |
| Improbable              | E     | Muy poco probable, se puede suponer que la ocurrencia no se experimentará en la vida de un item.              | Poco probable que ocurra, pero posible.   |
| Eliminado               | F     | Incapaz de ocurrir. Este nivel se utiliza cuando los peligros potenciales se identifican y luego se eliminan. | Incapaz de ocurrir. Este nivel se utiliza cuando los peligros potenciales se identifican y luego se eliminan. |

Tomado de MIL-STD-882E Práctica estándar para la seguridad del sistema (Departamento de Defensa de EEUU, 2012)

**Figura 17** *Matriz de evaluación de riesgos.*

| MATRIZ DE EVALUACIÓN DE RIESGOS |                     |                |                 |                     |
|---------------------------------|---------------------|----------------|-----------------|---------------------|
| SEVERIDAD<br>PROBABILIDAD       | Catastrófico<br>(1) | Critico<br>(2) | Marginal<br>(3) | Despreciable<br>(4) |
| Frecuente<br>(A)                | Alto                | Alto           | Serio           | Medio               |
| Probable<br>(B)                 | Alto                | Alto           | Serio           | Medio               |
| Ocasional<br>(C)                | Alto                | Serio          | Medio           | Bajo                |
| Remoto<br>(D)                   | Serio               | Medio          | Medio           | Bajo                |
| Improbable<br>(E)               | Medio               | Medio          | Medio           | Bajo                |
| Eliminado<br>(F)                | Eliminado           |                |                 |                     |

Tomado de MIL-STD-882E Práctica estándar para la seguridad del sistema (Departamento de Defensa de EEUU, 2012)

#### 4.2 Análisis de Criticidad

En base a la información recopilada del proceso de generación de energía en la Central Hidroeléctrica Palmas, se realiza el análisis de criticidad, el cual permite jerarquizar los sistemas o equipos en función a su impacto global en un período anual, identificando de esta forma los sistemas o equipos a los cuales se debe enfocar el RCM.

**Tabla 1** *Análisis de criticidad.*

| ANÁLISIS DE CRITICIDAD |                  | IMPACTOS             |                       |           |          | Suma de Impactos | Riesgo |
|------------------------|------------------|----------------------|-----------------------|-----------|----------|------------------|--------|
| SISTEMAS               | Frecuencia anual | Costos de Reparación | Impacto en Producción | Seguridad | Ambiente | C                | F X C  |
| Cojinete Guía          | 7                | 5                    | 4                     | 3         | 2        | 14               | 98     |
| Generador              | 6                | 4                    | 5                     | 3         | 2        | 14               | 84     |
| Regulador Hidráulico   | 5                | 2                    | 4                     | 3         | 3        | 12               | 60     |
| Cojinete de Empuje     | 4                | 3                    | 3                     | 2         | 2        | 10               | 40     |
| Excitatriz             | 3                | 3                    | 3                     | 2         | 2        | 10               | 30     |
| Válvula de Alivio      | 3                | 2                    | 3                     | 2         | 3        | 10               | 30     |
| Estator                | 2                | 2                    | 2                     | 3         | 2        | 9                | 18     |
| Válvula Esférica       | 2                | 2                    | 3                     | 2         | 2        | 9                | 18     |
| Base Patín Cojinete    | 2                | 2                    | 1                     | 2         | 1        | 6                | 12     |
| Caja Sello Mecánico    | 1                | 4                    | 1                     | 3         | 3        | 11               | 11     |
| Rodete                 | 1                | 4                    | 2                     | 3         | 2        | 11               | 11     |
| Serpentín              | 1                | 2                    | 2                     | 2         | 2        | 8                | 8      |
| Transformador 4.5 MW   | 1                | 1                    | 2                     | 2         | 2        | 7                | 7      |

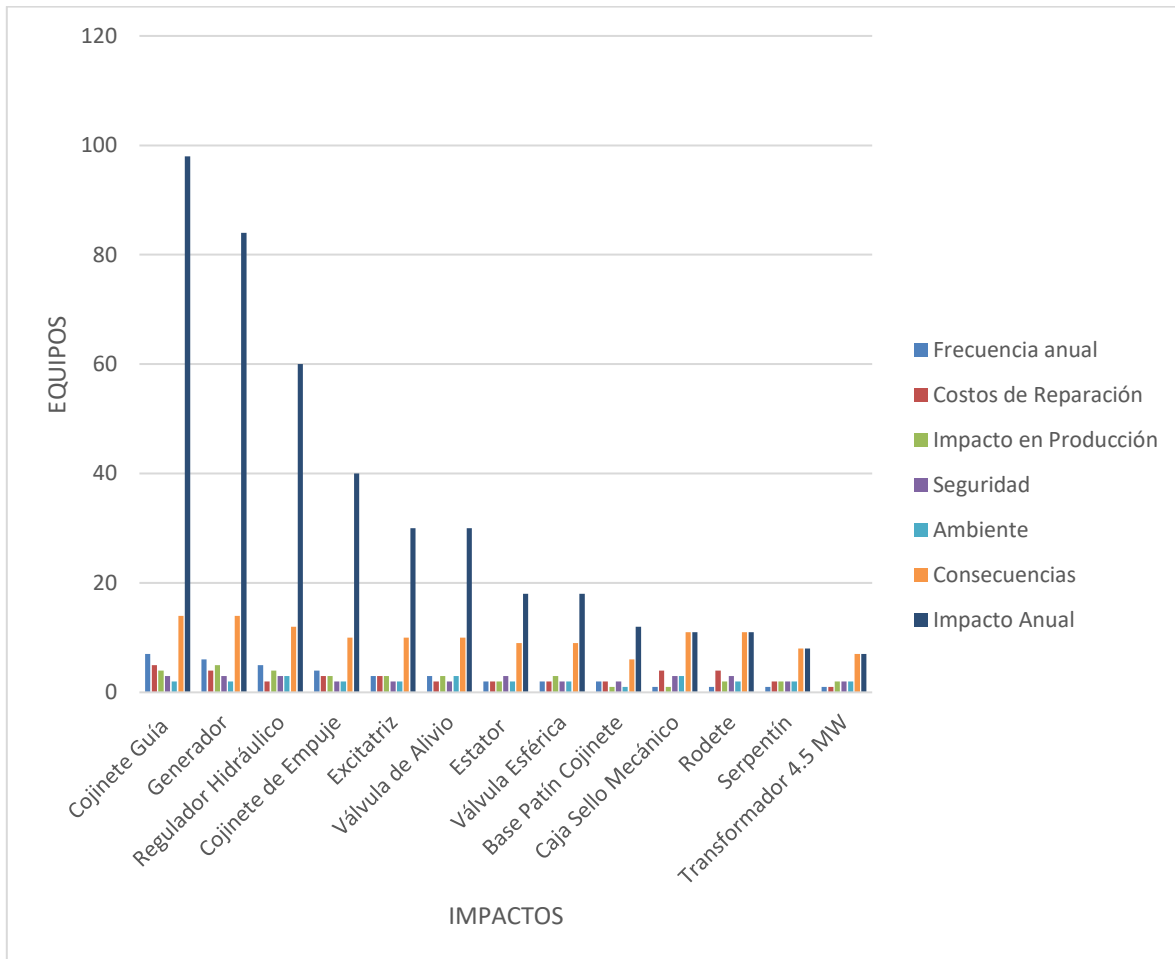
  

| Cualidad   | Peso |
|------------|------|
| Alto       | 5    |
| Medio alto | 4    |
| Medio      | 3    |
| Medio Bajo | 2    |
| Bajo       | 1    |
| Ninguno    | 0    |

La tabla muestra el resultado del análisis de criticidad realizado en la CH Palmas a la Unidad 1, en ella podemos observar que los equipos que presentaron mayor número de fallas e impacto anual fueron en su orden: Cojinete Guía, Generador y Regulador Hidráulico, esto quiere decir que estos tres equipos son los más críticos y a su vez los que tienen oportunidad de mejora de mayor impacto, por lo tanto, se prioriza el análisis de estos equipos como parte del desarrollo del proceso de implementación del RCM.

A continuación, se expone el resultado del análisis de criticidad en un diagrama de bloques.

**Figura 18** *Análisis de Mejorabilidad.*



Para continuar con la siguiente fase del proceso de implementación se determina de manera anticipada el nivel de detalle que es necesario para realizar el FMECA.

### 4.3 Análisis de Modos y Efectos de Fallas (FMECA)

El Análisis de Modos y Efectos de Fallas es redactado conforme al formato FMECA, el proceso de evaluación de los modos de fallas busca identificar las formas por las cuales un equipo puede perder su funcionalidad dentro del proceso, así mismo, sus efectos y consecuencias

considerables teniendo en cuenta los tres criterios básicos del RCM (operación, seguridad y medio ambiente).

El FMECA se desarrolla considerando los equipos más críticos encontrados de acuerdo con el análisis de criticidad, debido a esto, el análisis se enfoca en el cojinete guía de turbina, el generador y el regulador hidráulico.

La primera actividad que se desarrolla es la revisión de los detalles técnicos del equipo, para luego realizar el diligenciamiento del formato.

#### **4.3.1 Cojinete Guía**

Marca: Charmilles

**Figura 19** *Cojinete Guía de Turbina.*

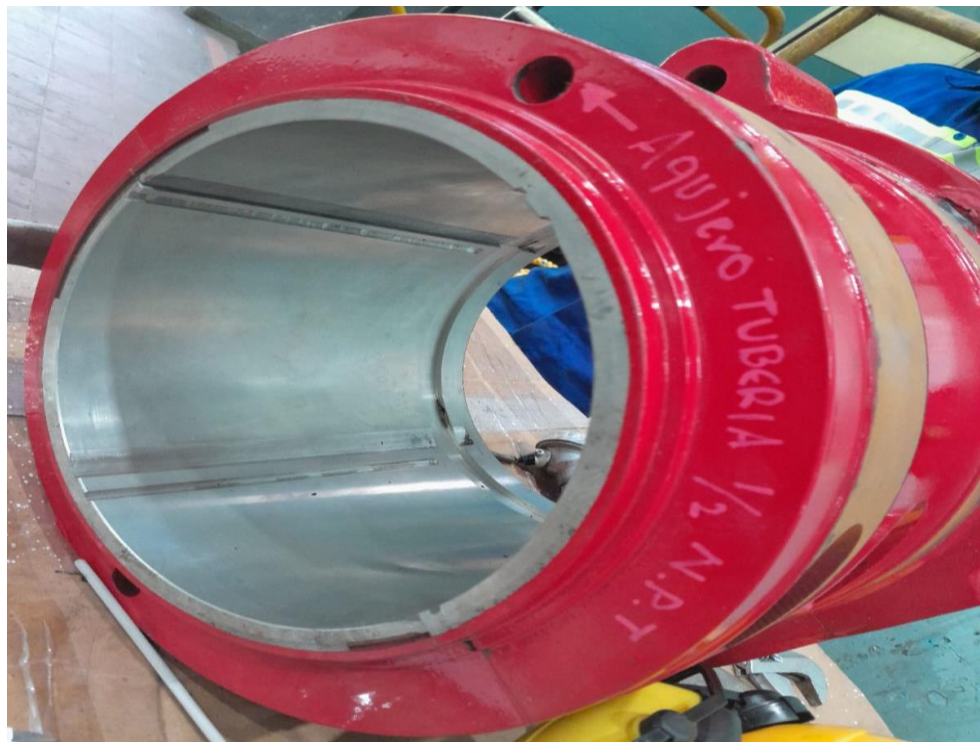


Figura 20 Revisión planes de mantenimiento-confiabilidad cojinete guía.

| Revision Planes de Mantenimiento-confiabilidad |                                  |                                      |   | Consecuencias<br>S = Seguridad<br>O = Operación<br>N = No Operacional<br>H = Oculta<br>A = Ambiente |  | Severidad              |           | 1 Mayor o igual a \$10M<br>2 Entre \$1M y \$10M<br>3 Entre \$100k y \$1M<br>4 Menor a \$100k |                                |       |
|--|----------------------------------|--------------------------------------|---|---|--|------------------------|-----------|--|--------------------------------|-------|
| Complejo: Central                              |                                  | Planta: Palmas                       |   | Pagina:   |  | Sistema: Cojinete Guía |           | Función:   |                                |       |
| Facilitador: Coordinador de Mantenimiento      |                                  |                                      | Planta: Palmas                                |   |  | Subsistema:            |           |  | Función:                       |       |
| No:  | Componente Parte/Item Mantenible | Modo de Falla                        | Cual es la Causa Raíz? Mecanismo de deterioro | Infantil, Aleatoria, Edad   | Efectos de falla (HP) Horas de parada afectando sist: (TR) Tarea de reparación: (CR) Costos de reparación: (FA) Frecuencia anual: Sint: Sintomas | Consecuencias          | Severidad | Tarea Recomendada en contra de las causas o de las consecuencias de falla                    | Ejecutor                       | Frec. |
| 1  | RTD COJINETE GUÍA                | Falla en el conector de RTD          | Degradación                                   | Aleatorio   | HP: 3  | H                      | 1         | Realizar medición y análisis de aislamiento  | Técnicos de Mantenimiento Essa | 1     |
|  |                                  |                                      |   |   | TR: Cambio de conector (macho y hembra)  | S                      | 2         |  |                                |       |
|  |                                  |                                      |   |   | FA: 1  | O                      | 3         |  |                                |       |
|  |                                  |                                      |   |   | Sint: Parada de la Unidad  | N                      | 4         |  |                                |       |
| 2  | TUBO DE COMPENSACIÓN             | Fuga de agua en tubo de compensación | Desgaste                                      | Aleatorio   | HP: 2  | H                      | 1         | Realizar mantenimiento preventivo  | Técnicos de Mantenimiento Essa | 3M    |
|  |                                  |                                      |   |   | TR: Se ajusta tornillería  | S                      | 2         |  |                                |       |
|  |                                  |                                      |   |   | FA: 2  | O                      | 3         |  |                                |       |
|  |                                  |                                      |   |   | Sint: Parada de la Unidad  | N                      | 4         |  |                                |       |
| 3  | COJINETE GUÍA                    | Fuga de aceite en cojinete guía      | Desgaste                                      | Aleatorio   | HP: 16   | H                      | 1         | Realizar un adecuado balanceo, centrado y alineado de la unidad antes de entrar en operación | Técnicos de Mantenimiento Essa | 1     |
|  |                                  |                                      |   |   | TR: Cambio de cojinete   | S                      | 2         |  |                                |       |
|  |                                  |                                      |   |   | FA: 1  | O                      | 3         |  |                                |       |
|  |                                  |                                      |   |   | Sint: Parada de la Unidad  | N                      | 4         |  |                                |       |
| 4  | CAJA DE SELLO MECÁNICO           | Desgaste de sello mecánico           | Desgaste                                      | Edad  | HP: 8  | H                      | 1         | Revisión de fugas en la caja de sello mecánico   | Técnicos de Mantenimiento Essa | 1     |
|  |                                  |                                      |   |   | TR: Cambio del sello mecánico  | S                      | 2         |  |                                |       |
|  |                                  |                                      |   |   | FA: 1  | O                      | 3         |  |                                |       |
|  |                                  |                                      |   |   | Sint: Salida de agua en la turbina cuando la válvula esférica se encuentra cerrada   | N                      | 4         |  |                                |       |

### 4.3.2 *Generador*

**Figura 21** *Generador.*

|                            |            |
|----------------------------|------------|
| <b>TIPO:</b>               | SINCRONICO |
| <b>CAPACIDAD:</b>          | 5,6 MVA    |
| <b>FRECUENCIA:</b>         | 60 Hz      |
| <b>FACTOR DE POTENCIA:</b> | 0,8        |
| <b>NUMERO POLOS:</b>       | 10         |
| <b>VELOCIDAD:</b>          | 720 rpm    |
| <b>VOLTAJE:</b>            | 4,16 kV    |
| <b>CORRIENTE:</b>          | 780 A      |
| <b>FABRICANTE:</b>         | SECHERON   |

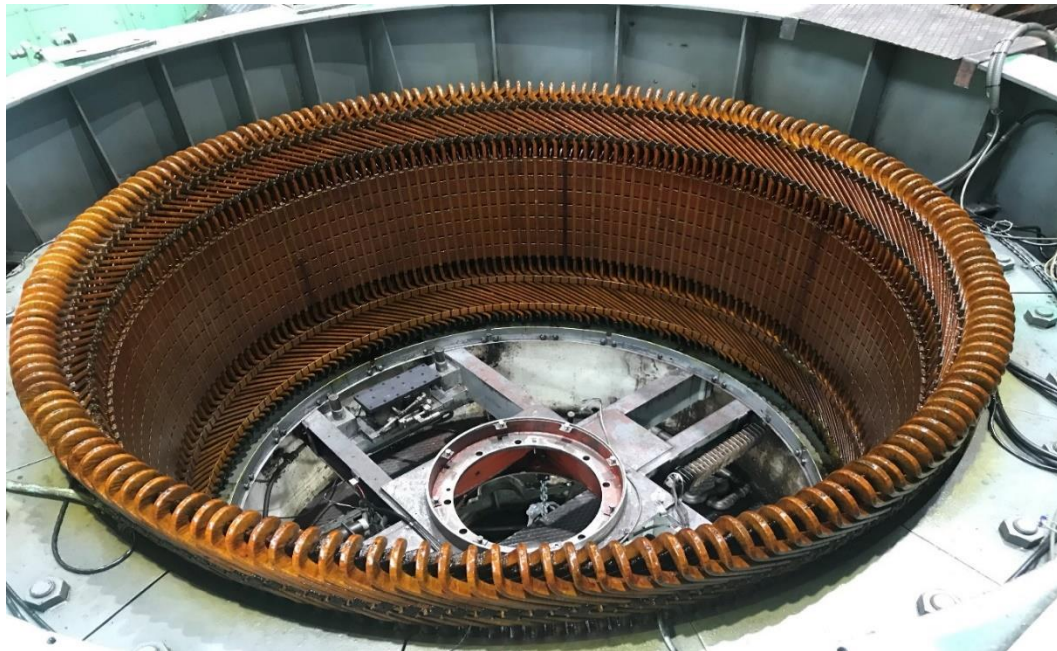


Figura 22 Revisión planes de mantenimiento-confiabilidad generador.

| Revision Planes de Mantenimiento-confiabilidad |                                 |                                |   | Consecuencias  |  | Severidad  |  |   |                            |       |
|--|---------------------------------|--------------------------------|---|--|--|--|--|---|----------------------------|-------|
|  |                                 |                                |   | S = Seguridad<br>O = Operación<br>N = No Operacional<br>H = Oculta<br>A = Ambiente |  | 1 Mayor o igual a \$10M<br>2 Entre \$1M y \$10M<br>3 Entre \$100k y \$1M<br>4 Menor a \$100k |  |   |                            |       |
| Complejo: Central                              |                                 | Planta: Palmas                 |   | Pagina:  |  | Sistema: Generador U1  |  | Función:  |                            |       |
| Facilitador: Coordinador de Mantenimiento      |                                 |                                | Planta: Palmas                                |  |  | Subsistema:  |  | Función:  |                            |       |
| No:  | Componente Parte/tem Mantenible | Modo de Falla                  | Cual es la Causa Raíz? Mecanismo de deterioro | Infantil, Aleatoria, Edad  | Efectos de falla (HP) Horas de parada afectando sist: (TR) Tarea de reparación: (CR) Costos de reparación: (FA) Frecuencia anual: Sint: Sintomas | Consecuencias  | Severidad  | Tarea Recomendada en contra de las causas o de las consecuencias de falla | Ejecutor                   | Frec. |
| 1  | EXCITATRIZ                      | Falla de porta escobillas      | Degradación                                   | Aleatorio  | HP: 24   | H  | 1  | Aplicar el torque a la tornillería especificado por el fabricante         | Técnico Mantenimiento Essa | 1     |
|  |                                 |                                |   |  | TR: Cambio de tres porta escobillas  | S  | 2  |   |                            |       |
|  |                                 |                                |   |  | FA: 1  | O  | 3  |   |                            |       |
|  |                                 |                                |   |  | Sint: Falta de excitación  | N  | 4  |   |                            |       |
| 2  | ROTOR                           | Aislamiento bajo               | Desgaste                                      | Aleatorio  | HP: 36   | H  | 1  | Realizar medición y análisis de aislamiento                               | Técnico Mantenimiento Essa | 1     |
|  |                                 |                                |   |  | TR: Cambio de bobinado   | S  | 2  |   |                            |       |
|  |                                 |                                |   |  | FA: 1  | O  | 3  |   |                            |       |
|  |                                 |                                |   |  | Sint: Salida de la unidad por falla del rotor  | N  | 4  |   |                            |       |
| 3  | COJINETE SUPERIOR               | Falla de anillo de aislamiento | Degradación                                   | Aleatorio  | HP: 13   | H  | 1  | Limpieza e inspección del turbogruppo. Tener repuesto nuevo en stock.     | Técnico Mantenimiento Essa | 1     |
|  |                                 |                                |   |  | TR: Cambio de cojinete superior  | S  | 2  |   |                            |       |
|  |                                 |                                |   |  | FA: 1  | O  | 3  |   |                            |       |
|  |                                 |                                |   |  | Sint: Parada de unidad   | N  | 4  |   |                            |       |
|  | Falla de RTD                    | Desgaste                       | Aleatorio                                     | HP: 2  | H  | 1  | Realizar mantenimiento predictivo de aislamiento | Técnico Mantenimiento Essa  | 1                          |       |
|  |                                 |                                |   | TR: Cambio de RTD del cojinete   | S  | 2  |  |   |                            |       |
|  |                                 |                                |   | FA: 1  | O  | 3  |  |   |                            |       |
|  |                                 |                                |   | Sint: Señal errada en la fase S de las temperaturas eléctricas                     | N  | 4  |  |   |                            |       |

### ***4.3.3 Regulador Hidráulico***

Marca Charmilles

**Figura 23** *Regulador Hidráulico.*



Tomado de Manual de operación Planta Palmas Essa.

**Figura 24** Revisión planes de mantenimiento-confiabilidad regulador hidráulico.

| Revisión Planes de Mantenimiento-confiabilidad |                                  |                                      | Consecuencias  |                               | Severidad  |                         |   |   |                                |    |
|--|----------------------------------|--------------------------------------|--|-------------------------------|--|-------------------------|---|---|--------------------------------|----|
|  |                                  |                                      | S = Seguridad<br>O = Operación<br>N = No Operacional<br>H = Oculta<br>A = Ambiente |                               | 1 Mayor o igual a \$10M<br>2 Entre \$1M y \$10M<br>3 Entre \$100k y \$1M<br>4 Menor a \$100k   |                         |   |   |                                |    |
| Complejo: Central                              |                                  | Planta:                              | Página:  | Sistema: Regulador Hidráulico |  | Función:                |   |   |                                |    |
| Facilitador: Coordinador de Mantenimiento      |                                  | Planta: Palmas                       |  | Subsistema:                   |  | Función:                |   |   |                                |    |
| No:  | Componente Parte/Item Mantenible | Modo de Falla                        | Cual es la Causa Raíz? Mecanismo de deterioro                                      | Infantil, Aleatoria, Edad     | Efectos de falla (HP) Horas de parada afectando sist: (TR) Tarea de reparación: (CR) Costos de reparación: (FA) Frecuencia anual: Sint: Síntomas | Consecuencias Severidad | Tarea Recomendada en contra de las causas o de las consecuencias de falla | Ejecutor                                    | Frec.                          |    |
| 1  | HORQUILLA DEL REGULADOR          | Rotura de Horquilla del Regulador    | Desgaste   | Aleatorio                     | HP: 36   | H                       | 1   | Reforzar capacitación a operadores          | Técnicos de Mantenimiento Essa | 1  |
|  |                                  |                                      |  |                               | TR: Reparación con soldadura   | S                       | 2   |   |                                |    |
|  |                                  |                                      |  |                               | FA: 1  | O                       | 3   |   |                                |    |
|  |                                  |                                      |  |                               | Sint: Parada de la unidad por falla en operación   | N                       | 4   |   |                                |    |
| 2  | TUBERIA DE SUCCIÓN               | Fuga de Aceite en tubería de succión | Degradación  | Aleatorio                     | HP: 24   | H                       | 1   | Realizar mantenimiento preventivo periódico | Técnicos de Mantenimiento Essa | 3M |
|  |                                  |                                      |  |                               | TR: Cambio de empaquetadura  | S                       | 2   |   |                                |    |
|  |                                  |                                      |  |                               | FA: 2  | O                       | 3   |   |                                |    |
|  |                                  |                                      |  |                               | Sint: Parada de la Unidad  | N                       | 4   |   |                                |    |
| 3  | REGULADOR HIDRÁULICO             | Falla de parámetros eléctricos       | Descalibración   | Aleatorio                     | HP: 8  | H                       | 1   | Realizar análisis y medición predictiva     | Técnicos de Mantenimiento Essa | 4M |
|  |                                  |                                      |  |                               | TR: Calibración de parámetros  | S                       | 2   |   |                                |    |
|  |                                  |                                      |  |                               | FA: 1  | O                       | 3   |   |                                |    |
|  |                                  |                                      |  |                               | Sint: Pérdida de indicación local  | N                       | 4   |   |                                |    |

#### 4.3.4 Planeación de mantenimiento preventivo y predictivo.

El planteamiento de las rutinas de mantenimiento preventivo y predictivo relacionadas en la siguiente tabla requieren definir el intervalo de acción de cada una de estas actividades en base al estudio RCM desarrollado con el fin de realizar labores de mantenimiento periódicas que nos lleven a evitar fallas en la unidad, que posteriormente afecten la funcionalidad de esta.

**Tabla 2** Planeación mantenimiento preventivo y predictivo.

| Equipo                          | Descripción                   | Tipo de mantenimiento | Actividades  | Frecuencia | Condición | Horas | Personal encargado               |
|---------------------------------|-------------------------------|-----------------------|--|------------|-----------|-------|----------------------------------|
| <b>Banco de Baterías</b>        | Mantenimiento mensual         | Preventivo            | Inspección y pruebas al Banco de baterías                    | Mensual    | E/L       | 2     | Técnico<br>Mantenimiento<br>Essa |
| <b>Cojinete de empuje</b>       | Análisis semestral            | Preventivo            | Análisis semestral de aceite                                 | Semestral  | F/L       | 4     | Técnico<br>Mantenimiento<br>Essa |
| <b>Cojinete de empuje</b>       | Toma de vibraciones mecánicas | Predictivo            | Toma y análisis de vibraciones mecánicas                     | Mensual    | E/L       | 1     | Técnico<br>Mantenimiento<br>Essa |
| <b>Cojinete guía de turbina</b> | Análisis semestral            | Preventivo            | Análisis semestral de aceite                                 | Semestral  | F/L       | 4     | Técnico<br>Mantenimiento<br>Essa |
| <b>Cojinete guía de turbina</b> | Toma de vibraciones mecánicas | Predictivo            | Toma y análisis de vibraciones mecánicas                     | Mensual    | E/L       | 1     | Técnico<br>Mantenimiento<br>Essa |
| <b>Cojinete inferior</b>        | Análisis semestral            | Preventivo            | Análisis semestral de aceite                                 | Semestral  | F/L       | 4     | Técnico<br>Mantenimiento<br>Essa |
| <b>Cojinete inferior</b>        | Toma de vibraciones mecánicas | Predictivo            | Toma y análisis de vibraciones mecánicas                     | Mensual    | E/L       | 1     | Técnico<br>Mantenimiento<br>Essa |
| <b>Cojinete superior</b>        | Análisis semestral            | Preventivo            | Análisis semestral de aceite                                 | Semestral  | F/L       | 4     | Técnico<br>Mantenimiento<br>Essa |
| <b>Cojinete superior</b>        | Toma de vibraciones mecánicas | Predictivo            | Toma y análisis de vibraciones mecánicas                     | Mensual    | E/L       | 1     | Técnico<br>Mantenimiento<br>Essa |
| <b>Estator</b>                  | Mantenimiento anual           | Preventivo            | Toma y análisis de aislamiento                               | Anual      | F/L       | 12    | Técnico<br>Mantenimiento<br>Essa |
| <b>Estator</b>                  | Mantenimiento mayor           | Preventivo            | Mantenimiento mayor cada 14000 horas de trabajo de la unidad | 18 meses   | F/L       | 720   | Técnico<br>Mantenimiento<br>Essa |

|                              |                               |            |  |               |     |     |                                  |
|------------------------------|-------------------------------|------------|--|---------------|-----|-----|----------------------------------|
| <b>Excitatriz</b>            | Mantenimiento anual           | Predictivo | Medición y análisis de aislamiento, calibración              | Anual         | F/L | 10  | Técnico<br>Mantenimiento<br>Essa |
| <b>Generador Sincrónico</b>  | Pruebas de aislamiento        | Predictivo | Realizar pruebas de aislamiento al generador sincrónico      | Trimestral    | F/L | 10  | Técnico<br>Mantenimiento<br>Essa |
| <b>Regulador Hidráulico</b>  | Mantenimiento bimestral       | Preventivo | Inspección y limpieza al regulador hidráulico                | Bimestral     | E/L | 6   | Técnico<br>Mantenimiento<br>Essa |
| <b>Rotor</b>                 | Mantenimiento mayor           | Preventivo | Mantenimiento mayor cada 14000 horas de trabajo de la unidad | 18 meses      | F/L | 720 | Técnico<br>Mantenimiento<br>Essa |
| <b>Rotor</b>                 | Pruebas de aislamiento        | Predictivo | Realizar pruebas de aislamiento al rotor cada tres meses     | Trimestral    | F/L | 10  | Técnico<br>Mantenimiento<br>Essa |
| <b>Tablero de auxiliares</b> | Termografía                   | Predictivo | Toma de termografía  | Mensual       | E/L | 2   | Técnico<br>Mantenimiento<br>Essa |
| <b>Tuberías de carga</b>     | Medición de espesores         | Predictivo | Realizar medición de espesores a las tuberías de carga       | Cuatrimestral | E/L | 40  | Técnico<br>Mantenimiento<br>Essa |
| <b>Túnel de conducción</b>   | Inspección                    | Preventivo | Inspección al túnel de conducción                            | Anual         | F/L | 8   | Técnico<br>Mantenimiento<br>Essa |
| <b>Turbina</b>               | Mantenimiento mensual         | Preventivo | Inspección y lubricación de la turbina                       | Mensual       | E/L | 12  | Técnico<br>Mantenimiento<br>Essa |
| <b>Turbina</b>               | Toma de vibraciones mecánicas | Predictivo | Toma y análisis de vibraciones mecánicas                     | Mensual       | E/L | 2   | Técnico<br>Mantenimiento<br>Essa |
| <b>Válvula de Alivio</b>     | Mantenimiento mensual         | Preventivo | Inspección y limpieza de la válvula de alivio                | Mensual       | E/L | 3   | Técnico<br>Mantenimiento<br>Essa |

A continuación, se relacionan las actividades específicas de mantenimiento a desempeñar en cada uno de los equipos con el fin de aplicar eficientemente el plan.

**Banco de Baterías:** es tipo plomo ácido con placas positivas tubulares. Se debe realizar aseo y limpieza a cada batería, se verifica el nivel del electrolito, se revisan tapas, sellos, terminales y conectores. Se debe realizar medición de la tensión y densidad de cada batería, por último, se realiza medición de la tensión del banco con cargador (en bornes del banco).

Se deben ejecutar las siguientes prácticas de mantenimiento al Cojinete de Empuje, Cojinete Guía de Turbina, Cojinete Inferior y al Cojinete Superior:

**Análisis de Aceite:** Se debe realizar un recuento de partículas, el cual, nos permite determinar el índice de contaminación del aceite. Se realiza también una prueba de viscosidad con el fin de averiguar si el aceite puede continuar protegiendo los componentes del equipo, generalmente un resultado de viscosidad superior al 15% indica que se debe cambiar el aceite. Por último, se hace una prueba de porcentaje de agua, el volumen de agua en partes por millón es un análisis indispensable si hay sospecha de una fuga.

**Toma de Vibraciones Mecánicas:** Tomar lecturas de vibración con carga durante cinco minutos de todos los puntos, incluyendo las medidas de la carcasa del estator y de la excitación, teniendo en cuenta que se medirán solamente los sensores de desplazamiento cuya tensión de salida se encuentre en el rango de -6 a -14vdc. Luego se debe tomar lecturas de vibración con la unidad generadora a velocidad nominal y con excitación durante cinco minutos de todos los puntos, incluyendo las medidas de la carcasa del estator y de la excitación. Posteriormente se toman lecturas de vibración con la unidad generadora a velocidad nominal y sin excitación durante cinco minutos de todos los puntos, incluyendo las medidas de la carcasa del estator y de la excitación.

**Estator:** Se debe ejecutar un mantenimiento mayor cada 14000 horas de trabajo de la unidad, el cual consiste en la limpieza del equipo con desplazador de humedad y limpiador dieléctrico, se debe colocar calefacción para sacar la humedad de la bobina y posteriormente pintar el equipo con barniz dieléctrico.

**Toma y Análisis de Aislamiento:** Se realiza con un equipo Megger MIT 1025, de acuerdo con la norma 43-2000 del IEEE se deben cortocircuitar las salidas del secundario, es decir, unir

los tres puntos con un cable (el de polaridad positiva) y el cable con polaridad negativa del Megger va a tierra. Se ejecuta una prueba IP (Índice de Polarización), la cual consiste en inyectar una tensión de 2500 V durante 30 segundos, se repite este procedimiento cada minuto durante 10 minutos. Luego se realiza una prueba IA (Índice de Absorción) durante 1 minuto, los resultados dados en megaohmios nos deben arrojar por encima de los rangos de tolerancia.

Excitatriz: Se realiza la calibración de las porta escobillas en sitio. Se deben realizar pruebas de aislamiento al igual que en el Estator, pero solamente las de IA (Índice de Absorción).

Generador Sincrónico: Al igual que en el Estator se realizan las pruebas de aislamiento de la siguiente manera:

Toma y Análisis de Aislamiento: Se realiza con un equipo Megger MIT 1025, de acuerdo con la norma 43-2000 del IEEE se deben cortocircuitar las salidas del secundario, es decir, unir los tres puntos con un cable (el de polaridad positiva) y el cable con polaridad negativa del Megger va a tierra. Se ejecuta una prueba IP (Índice de Polarización), la cual consiste en inyectar una tensión de 2500 V durante 30 segundos, se repite este procedimiento cada minuto durante 10 minutos. Luego se realiza una prueba IA (Índice de Absorción) durante 1 minuto, los resultados dados en megaohmios nos deben arrojar por encima de los rangos de tolerancia.

Regulador Hidráulico: Se debe hacer inspección visual y realizar limpieza a las toberas, prueba hidrostática al serpentín para detectar fugas de agua, engrase a la volante y prueba de presión a la bomba electromecánica, la cual debe arrojar 20 Bar para determinar que se encuentra en condiciones óptimas de trabajo.

Rotor: Se debe ejecutar un mantenimiento mayor cada 14000 horas de trabajo de la unidad, el cual consiste en la limpieza del rotor y los polos del generador con desplazador de humedad y

limpiador dieléctrico, se debe colocar calefacción para sacar la humedad y posteriormente pintar el equipo con barniz dieléctrico.

Se deben realizar pruebas de aislamiento, del mismo modo que en la excitatriz solamente las de IA (Índice de Absorción).

Tablero de Auxiliares: Se debe realizar un análisis termográfico con una cámara termográfica con la cual se apunta al tablero en diferentes puntos, sin tener contacto con éste. Las imágenes recopiladas por la cámara nos mostrarán si se encuentran “puntos calientes” en el tablero.

Tuberías de Carga: Con un equipo de medición de espesores por ultrasonido se realiza toma de datos de las dos tuberías, se referencian cuatro puntos cada tres metros (superior, inferior, lateral derecho y lateral izquierdo) y se anotan las medidas en el formato diseñado para esto, de este modo se identifica de manera cuatrimestral si los espesores en las tuberías mantienen sus medidas dentro de los rangos de tolerancia.

Túnel de Conducción: Se debe realizar la inspección visual en todo el trayecto que compone el túnel, aprovechando un desembalse controlado en la represa de bocas. El técnico encargado de la labor debe contar con el certificado de Espacios Confinados.

Turbina: Se debe realizar inspección visual y engrase de los brazos reguladores, bielas, bieletas y alabes.

Válvula de Alivio: Estando en línea la máquina se engrasa el pistón y se inspecciona visualmente si presenta fuga de agua. En el momento de un mantenimiento mayor o una parada de la máquina se debe inspeccionar la electroválvula.

## 5. Conclusiones

El análisis RCM depende siempre de las condiciones ambientales y operacionales a las que se encuentra sometido el equipo objeto de estudio, el hecho de que estas condiciones vayan cambiando con el transcurrir del tiempo nos permite la identificación de esta realidad de una manera más fácil, por lo tanto, permite la validación del análisis ya realizado con el fin de modificar y ajustar la metodología de mantenimiento en base a las condiciones cambiantes del equipo.

La implementación de la estrategia RCM permite la recuperación de la disponibilidad de las unidades de generación de energía de la Central Hidroeléctrica Palmas, la reducción de costos causados por paradas no programadas y alcanzar la meta de confiabilidad requerida.

Al ejecutar el FMECA se evidencian los equipos con mayor criticidad y esto nos representa el foco para proceder con la implementación del RCM, el cual es la base que nos lleva a mitigar fallas, paradas, pérdidas energéticas y económicas, porque este proceso es eficaz y confiable para mantener las unidades de generación de energía con una alta probabilidad de mejora continua optimizando el funcionamiento de los principales componentes, ya que las intervenciones a futuro se ejecutarán de forma programada y organizada.

Durante el desarrollo del presente trabajo se pudo detectar que hay oportunidades de mejora, las cuales pueden generar un gran impacto positivo para el área de mantenimiento, ya que, si se tiene debidamente documentado todo lo que se presenta, como las fallas registradas en su totalidad, el registro de órdenes de trabajo, con este histórico completo generará las intervenciones debidas para el equipo con el fin de aplicar un mantenimiento más eficaz.

La implementación de este proyecto permite aumentar el conocimiento del personal de mantenimiento respecto a cada equipo analizado, esto a futuro redundará en beneficios económicos para la compañía.

### Referencias

- Campos, O., Tolentino, G., Eslava, R., & Toledo, M. (2019). *Metodología de mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM) considerando taxonomía de equipos, base de datos y criticidad de efectos*. (Vol. 23). Instituto Politecnico Nacional.
- Department of Defense United States of America . (2012). Standard Practice System Safety.
- Fernández , L., & Lizcano , E. (2013). *Propuesta del plan de mantenimiento basado en RCM para un transformador de potencia de 150 MVA ubicado en la subestación Palos*. (U. I. Santander., Ed.) (Tesis de Grado).
- González , F. (2010). *Auditoría del Mantenimiento e Indicadores de Gestión*. . Madrid, España: Editorial Fundación Confemetal.
- Mesa, D., Ortiz, Y., & Pinzon, M. (s.f.). *La confiabilidad, la disponibilidad y la mantenibilidad, disciplinas modernas aplicadas al mantenimiento*. (Vol. 12). (U. T. Pereira, Ed.) Scientia Et Technica. (Tesis de Grado) Universidad Tecnológica de Pereira.
- Mora, L. (2009). *Mantenimiento Industrial Efectivo*. Envigado, Colombia: COLDI Limitada.
- Mora, L. (2009). *Mantenimiento planeación, ejecución y control*. México: ALFAOMEGA Grupo Editor.
- Moubray, J. (1999). *RCM II: Reliability Centered Maintenance*.
- Ordoñez, J. (2016). *Propuesta de implementación del mantenimiento centrado en confiabilidad para optimización de los planes de mantenimiento en una central hidroeléctrica*. Lima.
- Rey, F. (1996). *Hacia la excelencia en mantenimiento*. Madrid.

- Sifonte, J. (2017). *Reliability Centered Maintenance -Reengineered (RCM-R®)*.  
<https://consciousreliability.com/reliability-centered-maintenance-reengineered-rcm-r/>
- Society of Automotive Engineers. (2022). *SAE JA1012 A guide to the Reliability Centered Maintenance (RCM) Standard*. .
- Vacca, N. (2014). *Mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM II) para los equipos de enfriamiento, drenaje y desagüe en el montaje de las turbinas de generación; proyecto hidroeléctrico Sogamoso*. Bucaramanga.: (Tesis de Grado) Universidad Industrial de Santander.
- Vijay, E., & Chaturvedi, S. (2011). Prioritization of maintenance tasks on industrial equipment for reliability: A fuzzy approach. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 109-126.