

**UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA**

**Facultad de Ingeniería.**



**DISEÑO DE GUÍA DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO PARA LA TURBINA Y  
GENERADOR DE ENERGÍA EN CENTRAL HIDROELÉCTRICA.**

Trabajo de graduación en modalidad de tesis presentado por  
Félix Alejandro Célis Khán  
para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería en Tecnología  
Industrial.

Guatemala

2019



**DISEÑO DE GUÍA DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO PARA LA TURBINA Y  
GENERADOR DE ENERGÍA EN CENTRAL HIDROELÉCTRICA.**

**UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA**

**Facultad de Ingeniería.**



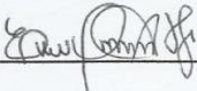
**DISEÑO DE GUÍA DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO PARA LA TURBINA Y  
GENERADOR DE ENERGÍA EN CENTRAL HIDROELÉCTRICA.**

Trabajo de graduación en modalidad de tesis presentado por  
Félix Alejandro Célis Khán  
para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería en Tecnología  
Industrial.

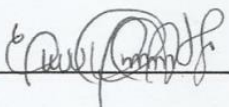
Guatemala

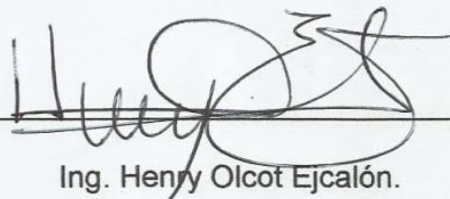
2019

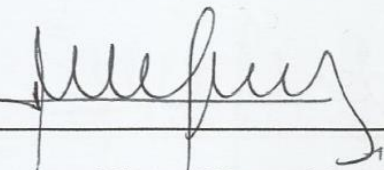
Vo. Bo.:

(f)   
Ing. Eriberto David Fuentes Chávez.

Tribunal Examinador:

(f)   
Ing. Eriberto David Fuentes Chávez.

(f)   
Ing. Henry Olcot Ejcalón.

(f)   
Ing. Héctor Alfonso Monzón.

Guatemala, 18 febrero de 2019

# ÍNDICE

|  | <b>Página.</b> |
|--|----------------|
| Lista de cuadros.....  | xi             |
| Lista de figuras.....  | xiv            |
| Resumen.....   | xvi            |
| I. INTRODUCCIÓN.....   | 1              |
| II. OBJETIVOS.....   | 2              |
| III. JUSTIFICACIÓN.....  | 3              |
| IV. MARCO TEÓRICO.....   | 4              |
| A. DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA.....                 | 4              |
| 1. Principio de funcionamiento.....                                      | 4              |
| B. GENERALIDADES DE LOS COMPONENTES DE LA CENTRAL DE ENERGÍA.....        | 5              |
| 1. Componentes de la central hidroeléctrica.....                         | 5              |
| a. Obras y elementos.....  | 5              |
| 1). Embalse para regulación diaria.....                                  | 5              |
| 2). Obra de toma.....  | 6              |
| 3). Chimenea de equilibrio.....  | 6              |
| 4). Canales de derivación, tuberías de alta densidad y alta presión..... | 6              |
| a). Tubería de baja presión.....   | 6              |
| b). Tubería de alta presión.....   | 6              |
| 5). Cuarto de máquinas.....  | 6              |
| b. Equipo electromecánico.....   | 7              |
| 1). Turbina.....   | 7              |
| 2). Máquina sincrónica o generador.....                                  | 7              |
| 3). Sistema de control.....  | 8              |
| 4). Subestación elevadora.....   | 8              |
| C. GENERALIDADES SOBRE EL MANTENIMIENTO INDUSTRIAL.....                  | 8              |
| 1. Definición del mantenimiento.....                                     | 8              |
| 2. Objetivos del mantenimiento industrial.....                           | 9              |

|   |    |
|---|----|
| 3. Tipos de mantenimiento.....                    | 9  |
| a. Mantenimiento correctivo.....                  | 10 |
| b. Mantenimiento preventivo.....                  | 10 |
| c. Mantenimiento predictivo.....                  | 10 |
| d. Mantenimiento productivo total.....            | 11 |
| D. ESTABLECIMIENTO DEL TIPO DE MANTENIMIENTO..... | 11 |
| 1. Gestión del mantenimiento.....                 | 11 |
| E. IDENTIFICACIÓN DE LOS EQUIPOS.....             | 12 |
| 1. Sistema de la turbina.....                     | 12 |
| a. Componentes del equipo principal.....          | 14 |
| 1). Tubería espiral o caracol.....                | 14 |
| 2). Inyector o boquilla.....                      | 14 |
| a). Aguja.....                                    | 14 |
| b). Tobera.....                                   | 14 |
| c). Deflector.....                                | 14 |
| 3). Rodete.....                                   | 15 |
| 4). Cámara de descarga.....                       | 15 |
| b. Componentes auxiliares.....                    | 15 |
| 1). Unidad de presión hidráulica (HPU).....       | 15 |
| 2). Válvula principal de entrada.....             | 16 |
| a). Cilindro hidráulico de doble efecto.....      | 17 |
| b). Contra peso.....                              | 17 |
| c). Actuador hidráulico del bypass.....           | 17 |
| d). Tubería de derivación.....                    | 17 |
| c. Principio de funcionamiento.....               | 18 |
| 2. Sistema máquina sincrónica.....                | 18 |
| a. Generador.....                                 | 19 |
| 1). Estator principal.....                        | 19 |
| 2). Rotor principal.....                          | 19 |

|  |    |
|--|----|
| 3). Cojinetes. ....  | 20 |
| 4). Caja de conexiones. ....   | 20 |
| 5). Freno. ....  | 21 |
| b. Excitatriz del generador. ....  | 22 |
| 1). Estator de la excitatriz. ....   | 23 |
| 2). Rotor de la excitatriz. ....   | 23 |
| 3). Excitatriz auxiliar (PMG). ....  | 23 |
| 4). Rectificador de diodos girantes. ....  | 23 |
| 5). Regulador de voltaje. ....   | 23 |
| 6). Excitatriz rueda dentada. ....   | 23 |
| c. Principio de funcionamiento. ....   | 24 |
| F. ANÁLISIS DE FALLA. ....   | 25 |
| 1. Identificación de fallas. ....  | 25 |
| 2. Evaluación de fallas y frecuencia de activación. ....                           | 33 |
| 3. Diagrama Ishikawa. ....   | 35 |
| G. PROGRAMA DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO. ....                                      | 38 |
| 1. Solicitud de mantenimiento a mercado mayorista. ....                            | 38 |
| 2. Secuencia de fuera línea. ....  | 39 |
| H. IDENTIFICACIÓN DE REPUESTOS. ....   | 39 |
| 1. Repuestos del sistema de la turbina. ....                                       | 40 |
| 2. Repuestos del generador y excitatriz. ....                                      | 40 |
| 3. Repuestos de la válvula principal de entrada. ....                              | 41 |
| 4. Repuestos de la unidad de presión hidráulica (HPU). ....                        | 42 |
| I. IDENTIFICACIÓN DE HERRAMIENTAS. ....  | 43 |
| 1. Herramientas manuales. ....   | 44 |
| 2. Herramientas eléctricas. ....   | 45 |
| J. PLAN SEGURO DE TRABAJO (PST). ....  | 46 |
| 1. Plan seguro de trabajo del sistema de la turbina y componentes auxiliares. .... | 47 |
| a. Plan seguro de trabajo de la turbina tipo Pelton. ....                          | 47 |

|   |    |
|---|----|
| b. Plan seguro de trabajo de la válvula principal de entrada.....   | 48 |
| c. Plan seguro de trabajo de la unidad de presión hidráulica (HPU).....   | 49 |
| 2. Plan seguro de trabajo de la máquina síncrona.....   | 50 |
| d. Plan seguro de trabajo del generador y excitatriz. ....  | 50 |
| K. CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES DE MANTENIMIENTO, DE LA TURBINA PELTON,<br>VÁLVULA PRINCIPAL DE ENTRADA, UNIDAD DE PRESIÓN HIDRÁULICA Y MÁQUINA<br>SÍNCRÓNICA..... | 51 |
| 1. Actividades preventivas del sistema de la turbina y componentes auxiliares. ....   | 52 |
| a. Actividades de la turbina.....   | 52 |
| b. Actividades de la válvula principal de entrada.....  | 53 |
| c. Actividades de la unidad de presión hidráulica.....  | 54 |
| 2. Actividades preventivas de la máquina síncrona. ....   | 55 |
| d. Actividades de la máquina síncrona. ....   | 55 |
| L. DISEÑO DE ORDEN DE TRABAJO DE MANTENIMIENTO. ....  | 56 |
| M. INSTRUCCIONES DE MANTENIMIENTO.....  | 57 |
| 1. Instrucciones de mantenimiento de la turbina Pelton.....   | 57 |
| a. Procedimiento de limpieza.....   | 57 |
| b. Procedimiento de inspección del estado del rodete con líquidos penetrantes. ....   | 57 |
| c. Procedimiento de calibración de carrera de las agujas de los inyectores.....   | 58 |
| d. Procedimiento de calibración de posición de los deflectores.....   | 59 |
| 2. Instrucciones de mantenimiento, válvula principal de entrada.....  | 60 |
| a. Procedimiento de limpieza.....   | 61 |
| b. Procedimiento de lubricación.....  | 61 |
| c. Procedimiento de purga del circuito oleo hidráulico. ....  | 61 |
| 3. Instrucciones de mantenimiento de la unidad de presión hidráulica (HPU).....   | 62 |
| a. Procedimiento de limpieza.....   | 62 |
| 1). Limpieza general. ....  | 62 |
| 2). Limpieza de los motores asíncronos de bombas.....   | 62 |
| 3). Limpieza de la bomba de engranajes. ....  | 63 |

|  |    |
|--|----|
| b. Procedimiento de lubricación.....   | 63 |
| 1). Lubricación al tanque de la unidad de presión hidráulica (HPU). ....       | 63 |
| 2). Lubricación de cojinetes del motor de la bomba.....                        | 65 |
| c. Procedimiento de cambio de cojinetes del motor de bomba de engranajes.....  | 65 |
| d. Procedimiento de medición de resistencia de aislamiento del motor.....      | 65 |
| 1). Medición de resistencia de aislamiento.....                                | 67 |
| a). Medición de resistencia de aislamiento eléctrico, fases con tierra. ....   | 67 |
| b). Medición de resistencia de aislamiento eléctrico entre fases. ....         | 67 |
| e. Procedimiento de cambio y mantenimiento de dispositivos de filtración. .... | 68 |
| 1). Regulador y elemento de filtración de presión de aceite. ....              | 68 |
| a). Desmontaje del elemento filtrante.....                                     | 68 |
| b). Montaje del elemento filtrante. ....                                       | 69 |
| 2). Filtro de línea de retorno. ....   | 69 |
| a). Desmontaje del elemento filtrante.....                                     | 70 |
| b). Montaje del elemento filtrante. ....                                       | 70 |
| 3). Filtro de ventilación del tanque.....                                      | 71 |
| a). Cambio de elemento filtrante. ....   | 71 |
| 4. Instrucciones de mantenimiento de la maquina sincrónica. ....               | 72 |
| a. Procedimiento de limpieza.....  | 72 |
| b. Procedimiento de lubricación.....   | 73 |
| 1). Lubricación de cojinete superior a aceite.....                             | 73 |
| 2). Lubricación de cojinete inferior a grasa.....                              | 74 |
| c. Procedimiento de testeo y medición de dispositivos y componentes.....       | 75 |
| 1). Test de diodos de la excitatriz. ....                                      | 75 |
| a). Diodo en buen estado. ....   | 75 |
| b). Diodo en mal estado. ....  | 75 |
| 2). Test de Varistores de la excitatriz. ....                                  | 75 |
| 3). Medición de resistencia de aislamiento o prueba de Megger. ....            | 75 |
| a). Finalidad.....   | 75 |

|  |     |
|--|-----|
| b). Procedimiento. ....  | 75  |
| c). Medición y registro de valores. ....                       | 77  |
| d. Instrucciones de mantenimiento del sistema de frenado. .... | 78  |
| N. INDICADORES DE GESTIÓN DEL MANTENIMIENTO. ....              | 79  |
| 1. Indicadores a implementar. ....                             | 79  |
| a. Tiempo medio entre fallas (MTBF). ....                      | 79  |
| b. Tiempo medio de recuperación entre fallas (MTTF). ....      | 79  |
| c. Disponibilidad total. ....                                  | 79  |
| 2. Aplicación de indicadores. ....                             | 80  |
| V. METODOLOGÍA. ....   | 81  |
| VI. RESULTADOS. ....   | 82  |
| VII. ANÁLISIS DE RESULTADOS. ....                              | 86  |
| VIII. CONCLUSIONES. ....                                       | 90  |
| IX. RECOMENDACIONES. ....                                      | 91  |
| X. BIBLIOGRAFÍA. ....  | 92  |
| XI. ANEXOS. ....   | 94  |
| XII. GLOSARIO. ....  | 101 |

## LISTA DE CUADROS.

|  | <b>Página.</b> |
|--|----------------|
| 1. Clasificación del mantenimiento. ....   | 11             |
| 2. Lista de máquinas de los equipos que conforman este estudio. ....   | 12             |
| 3. Descripción técnica de la turbina Pelton.....   | 12             |
| 4. Nomenclatura del modelo del generador síncrono SPA 800 instalado.....   | 18             |
| 5. Descripción técnica del generador síncrono instalado. ....  | 19             |
| 6. Características de los cojinetes del generador síncrono. ....   | 20             |
| 7. Descripción de conexiones del generador síncrono.....   | 21             |
| 8. Descripción técnica del freno del generador síncrono.....   | 22             |
| 9. Historial de fallas del mes de enero del 2017. ....   | 25             |
| 10. Historial de fallas del mes de febrero del 2017.....   | 26             |
| 11. Historial de fallas del mes de marzo del 2017.....   | 26             |
| 12. Historial de fallas del mes de abril del 2017. ....  | 27             |
| 13. Historial de fallas del mes de mayo del 2017. ....   | 27             |
| 14. Historial de fallas del mes de junio del 2017. ....  | 28             |
| 15. Historial de fallas del mes de julio del 2017.....   | 28             |
| 16. Historial de fallas del mes de agosto del 2017. ....   | 29             |
| 17. Historial de fallas del mes de septiembre del 2017. ....   | 29             |
| 18. Historial de fallas del mes de octubre del 2017.....   | 30             |
| 19. Historial de fallas del mes de noviembre del 2017.....   | 31             |
| 20. Historial de fallas del mes de diciembre del 2017. ....  | 31             |
| 21. Historial de fallas del mes de enero del 2018. ....  | 31             |
| 22. Historial de fallas del mes febrero del 2018. ....   | 32             |
| 23. Historial de fallas del mes de marzo del 2018.....   | 32             |
| 24. Frecuencia de activación de las fallas presentadas durante el año 2017 y el primer trimestre del 2018.. .... | 34             |
| 25. Listado de repuestos de la turbina Pelton. ....  | 40             |
| 26. Listado de repuestos del generador y excitatriz. ....  | 40             |

|   |    |
|---|----|
| 27. Listado de repuestos de la válvula principal de entrada.....  | 41 |
| 28. Listado de repuestos de la unidad de presión hidráulica (HPU). .....                                      | 42 |
| 29. Listado de herramientas manuales. ....  | 44 |
| 30. Listado de herramientas eléctricas. ....  | 45 |
| 31. Plan seguro de trabajo de la turbina Pelton.....  | 47 |
| 32. Plan seguro de trabajo de la válvula principal de entrada. ....   | 48 |
| 33. Plan seguro de trabajo de la unidad de presión hidráulica. ....   | 49 |
| 34. Plan seguro de trabajo del generador y excitatriz. ....   | 50 |
| 35. Cronograma de actividades de la turbina Pelton.....   | 52 |
| 36. Cronograma de actividades de la válvula principal de entrada. ....  | 53 |
| 37. Cronograma de actividades de la unidad de presión hidráulica. ....  | 54 |
| 38. Cronograma de actividades del generador y excitatriz. ....  | 55 |
| 39. Parámetros de carrera de aguja de inyectores. ....  | 58 |
| 40. Características técnicas del lubricante del HPU.....  | 64 |
| 41. Características técnicas de cojinetes de bombas de engranajes de la unidad de presión<br>hidráulica. .... | 65 |
| 42. Valores de prueba y aislamiento de resistencia de motores. ....   | 66 |
| 43. Parámetros de evaluación de aislamiento de resistencia.....   | 66 |
| 44. Datos técnicos del regulador de presión del sistema hidráulico.....                                       | 68 |
| 45. Datos técnicos de filtro de línea de retorno del tanque HPU. ....   | 69 |
| 46. Datos técnicos del filtro de ventilación del tanque HPU. ....   | 71 |
| 47. Características de los cojinetes del generador síncrono. ....   | 73 |
| 48. Fórmula para calcular el índice de polarización y absorción. ....   | 76 |
| 49. Rango de resultados del índice de polarización y absorción. ....  | 76 |
| 50. Indicadores de disponibilidad mensual, promedio del año 2017. ....  | 80 |
| 51. Identificación de la cantidad de actividades de mantenimiento de la turbina Pelton. ....                  | 82 |
| 52. Identificación de la cantidad de actividades de mantenimiento de la válvula principal de<br>entrada. .... | 83 |

|  |    |
|--|----|
| 53. Identificación de la cantidad de actividades de mantenimiento de la unidad de presión hidráulica (HPU).....        | 84 |
| 54. Identificación de la cantidad de actividades de mantenimiento de la máquina síncrona (Generador y Excitatriz)..... | 85 |
| 55. Cantidad de intrusiones de mantenimiento realizadas por equipo.....  | 87 |
| 56. Índice de indisponibilidad mensual, durante el periodo del 2017.....   | 89 |
| 57. Intervalos de lubricación del cojinete superior del generador, según la temperatura del aceite.<br>.....           | 94 |
| 58. Factores de corrección para los intervalos de lubricación del cojinete a grasa del generador.<br>.....             | 95 |
| 59. Matriz de coherencia utilizada mediante la investigación.....  | 96 |

## LISTA DE FIGURAS.

|  | <b>Página.</b> |
|--|----------------|
| 1. Esquema de construcción de la central hidroeléctrica. ....  | 4              |
| 2. Partes de la turbina tipo Pelton instalada. ....  | 13             |
| 3. Esquema del rodete y del inyector de la turbina Pelton instalada. ....  | 13             |
| 4. Inyector de la turbina Pelton instalada. ....   | 14             |
| 5. Esquema de las partes de un inyector. ....  | 14             |
| 6. Rodete tipo Pelton. ....  | 15             |
| 7. Esquema del diseño de la cámara de descarga o desfogue. ....  | 15             |
| 8. Unidad de presión hidráulica instalada. ....  | 16             |
| 9. Esquema de las partes de la válvula principal de entrada instalada. ....  | 17             |
| 10. Válvula principal de entrada instalada. ....   | 17             |
| 11. Principio de funcionamiento del sistema turbinado. ....  | 18             |
| 12. Esquema de posición de cojinetes del generador síncrono. ....  | 20             |
| 13. Esquema de ubicación de las conexiones del generador síncrono. ....  | 21             |
| 14. Esquema de ubicación del freno del generador síncrono. ....  | 22             |
| 15. Excitatriz del generador instalado. ....   | 22             |
| 16. Principio de funcionamiento de la maquina sincrónica. ....   | 24             |
| 17. Gráfica de cantidad de fallas en la central hidroeléctrica estudiada, durante el periodo de enero 2017 a marzo 2018. ....                  | 33             |
| 18. Fallas identificadas en la turbina Pelton, que provocan salidas forzadas durante la generación. ....                                       | 35             |
| 19. Fallas identificadas en la válvula principal de entrada, que provocan disparos y salidas forzadas durante la generación. ....              | 36             |
| 20. Fallas identificadas en la unidad de presión hidráulica (HPU), que provocan disparos y salidas forzadas durante la generación. ....        | 36             |
| 21. Fallas identificadas en la máquina sincrónica, que provocan disparos y salidas forzadas durante la generación. ....                        | 37             |
| 22. Gráfica de cantidad de fallas identificadas, que pueden presentarse en los equipos y provocar salidas forzadas durante la generación. .... | 37             |
| 23. Formato de orden de trabajo de mantenimiento. ....   | 56             |

|   |     |
|---|-----|
| 24. Pantalla de calibración de agujas en el panel de control de inyectores. ....                          | 59  |
| 25. Esquema de articulación de los deflectores de la turbina. ....  | 60  |
| 26. Motor de bomba de engranajes de la unidad de presión hidráulica. ....                                 | 63  |
| 27. Nivelación de lubricante del HPU. ....  | 64  |
| 28. Medición de resistencia de aislamiento, fases con tierra. ....  | 67  |
| 29. Medición de resistencia de aislamiento, entre fases. ....   | 67  |
| 30. Regulador y filtro de presión de aceite de la unidad de presión hidráulica. ....                      | 69  |
| 31. Elemento filtrante del dispositivo de retorno de la unidad de presión hidráulica. ....                | 70  |
| 32. Componentes del filtro de ventilación del tanque del HPU. ....  | 71  |
| 33. Ubicación de las rejillas de ventilación del generador síncrono. ....                                 | 72  |
| 34. Lubricación de cojinete superior de aceite del generador síncrono. ....                               | 73  |
| 35. Lubricación de cojinete inferior a grasa del generador síncrono. ....                                 | 74  |
| 36. Caja de conexión principal del generador. ....  | 77  |
| 37. Pastillas de freno del generador. ....  | 78  |
| 38. Gráfica de cantidad de repuestos identificados y listados por equipo.....                             | 87  |
| 39. Curva de disponibilidad promedio mensual durante el año 2017 en la central hidroeléctrica.<br>.....   | 88  |
| 40. Curva de Indisponibilidad promedio mensual durante el año 2017 en la central hidroeléctrica.<br>..... | 89  |
| 41. Esquema de funcionamiento de la unidad de presión hidráulica (HPU). ....                              | 94  |
| 42. Proceso de generación de energía en central hidroeléctrica. ....                                      | 99  |
| 43. Formato de ficha para muestreo de aceite en los equipos. ....   | 100 |

## RESUMEN

La realización del estudio consiste en el diseño de una guía de mantenimiento preventivo, para los principales equipos de una central hidroeléctrica, tomando en cuenta el de mayor relevancia que es la turbina, el encargado de transformar la energía mecánica a eléctrica que es el Generador y sus componentes auxiliares. Esto permitirá mantener la maquinaria en un estado óptimo para sus procesos de generación, consiguiendo así, satisfacer de manera eficiente la demanda, aumentando su disponibilidad.

Esta guía consiste en proponer una serie de actividades que permitan orientar al encargado a realizar de forma correcta, eficiente y segura el mantenimiento en los equipos tomados en cuenta en esta investigación, mediante la secuencia de pasos, se realiza la identificación de las herramientas necesarias y los repuestos de cada maquinaria. Se desarrolla un análisis explicando las medidas de seguridad y protecciones que se deben de tomar durante las etapas del mantenimiento (antes, durante y después), basadas en la identificación de los riesgos potenciales que pueden causar daños físicos al técnico o encargado del mantenimiento.

Para llevar un control de los trabajos y las actividades que se realizaron durante el mantenimiento en los equipos, se diseña un formato de orden de trabajo de mantenimiento, que permite describir el trabajo a realizar y los componentes utilizados.

Por medio de un análisis estadístico se determina la disponibilidad técnica que tuvo la planta durante el año 2017, implementando indicadores enfocados en la disponibilidad de maquinaria.

Dicha investigación tiene de resultados, disminuir las paradas no programadas para realizar acciones correctivas, el cual logra aumentar la disponibilidad de generación brindada al sistema nacional interconectado, logrando el mayor aprovechamiento de caudal en las temporadas de verano e invierno.

Se recomienda seguir tomando datos para determinar la disponibilidad técnica durante un periodo determinado, siendo esta mayor de 98% que es lo que se obtuvo durante el año 2017, antes de la realización de esta guía de mantenimiento.

## I. INTRODUCCIÓN

Esta investigación se centra en una planta de generación de energía eléctrica con recursos renovables hídricos. La finalidad es alimentar de energética a la red eléctrica del país, produciendo energía limpia y económica en largo plazo.

El proyecto consiste en proponer un diseño de una guía de mantenimiento preventivo para los equipos más relevantes en la planta generadora, la turbina Pelton y el generador vertical. Tomando en cuenta los equipos auxiliares que permiten que estos dos funcionen correctamente, siendo estos la unidad de presión hidráulica (HPU) y la válvula principal de entrada.

El beneficio de la guía es para el área administrativa, los operadores y encargados de mantenimiento, permite obtener una mayor disponibilidad con el sistema nacional interconectado, manteniendo constante la generación y facilitando los trabajos de mantenimiento, por medio de actividades rutinarias calendarizadas e instructivos, garantizando la integridad física del personal mediante la realización de un plan seguro de trabajo.

La investigación desarrollada se basa principalmente en la recopilación de datos del historial de disparos y salidas de línea, determinando los fallos funcionales y técnicos, sus motivos o causas y su clasificación en función a su frecuencia de activación y repetitividad.

Luego de esto se proponen periodos de sustitución y actividades de mantenimiento rutinarias durante periodos de operación y en paradas programadas para cada una de las máquinas. La gestión del mantenimiento se desarrolla, estableciendo tres mantenimientos al año, dos de ellos menores y uno mayor, durante la temporada invernal, debido a las incidencias de fallas identificadas durante el análisis de disparos y salidas de línea de la central hidroeléctrica en el año 2017.

Para llevar un mejor control de las tareas realizadas de mantenimiento, los tiempos, materiales, repuestos y herramientas utilizadas, se propone un formato de orden de trabajo que permite a la gestión de mantenimiento llevar en mejor orden un historial físico de las actividades realizadas.

Se mide por medio de la implementación de indicadores de gestión la disponibilidad técnica de la planta del año 2017. Siendo estos los siguientes, indicador tiempo entre fallas, tiempo medio de reparación y disponibilidad técnica.

Todas las actividades que forman parte de este mantenimiento, ayudarán que la central hidroeléctrica tenga una guía en la realización de su gestión de mantenimiento, permitiéndole tener un mejor control y una mejor organización en sus actividades.

## II. OBJETIVOS

### A. General:

Diseñar una guía de mantenimiento preventivo para la turbina y generador, en una central hidroeléctrica, basada en la recopilación de datos del historial de fallas, que optimice el funcionamiento de los equipos y aumente el índice de disponibilidad en la inyección de energía al sistema nacional interconectado.

### B. Específicos:

1. Desarrollar un análisis de falla, para determinar la causa de un defecto o problema, mediante la recopilación de datos del historial de los equipos.
2. Desarrollar un análisis de seguridad en el trabajo, identificando los peligros relacionados en cada etapa, desarrollando soluciones que minimicen el riesgo y garanticen la seguridad física de los responsables de la realización del mantenimiento.
3. Implementar un sistema de medición del mantenimiento, utilizando indicadores de gestión enfocados en la disponibilidad, para asegurar la efectividad y el control del mantenimiento propuesto.

### III. JUSTIFICACIÓN

La central hidroeléctrica debe suministrar energía en forma constante y permanente, sin paros imprevistos que afecten la generación, esto afecta la oferta firme eficiente, contratada y verificada por el Administrador de mercado mayorista (AMM).

Desde sus inicios en el año 2014, la central hidroeléctrica planteó generar 2.23MW de potencia, a pesar de ser esta su capacidad de generación, su eficiencia y disponibilidad brindada al sistema nacional interconectado, ha sido afectada por problemas en su equipo principal que es la turbina, empezando a disminuir constantemente a mediados del año 2017.

Su eficiencia en generación durante la hora pico, se mantuvo constante hasta inicios del año 2017, cumpliendo con los 2.23 MW de potencia, manteniendo de esta manera su demanda en el mercado, a mediados del año 2017 empieza a disminuir, hasta llegar a lo que actualmente se tiene que es de 1.95 MW, esto llevó a que su disponibilidad de generación se viera afectada, llegando aproximadamente a un 98%, que es la que se tiene actualmente, este valor real de disponibilidad fue calculado mediante la aplicación de indicadores de gestión del mantenimiento basados en la disponibilidad, no cumplir con la potencia contratada en el mercado les obliga a reducir la oferta firme eficiente durante el año en curso.

La cantidad total de fallas identificadas durante el periodo estudiado es de 89 disparos, que provocaron salidas de línea por problemas debido a causas externas e internas, siendo 50 en la temporada invernal y 39 durante la temporada de verano.

La gestión del mantenimiento se desarrolla, estableciendo 3 mantenimientos al año durante la temporada invernal, debido a las incidencias de fallas identificadas en el análisis de disparos y salidas de línea de la central hidroeléctrica en el año 2017, se identificó en el periodo invernal una mayor cantidad de salidas forzadas debido a problemas en la red eléctrica causados por tormentas electro atmosféricas y fallas internas en los equipos.

La investigación busca ser una guía para el modelo de mantenimiento preventivo en la empresa, basada en la recopilación de datos del historial de fallas. Se espera con esto mejorar el estado de la maquinaria y reducir el número de intervenciones por averías, mejorando por tanto su disponibilidad de generación, aplicando indicadores de gestión.

Adicionalmente se logra minimizar los vertimientos innecesarios del recurso hídrico y garantizará la integridad física del personal mediante la aplicación de un plan de trabajo seguro.

## IV. MARCO TEÓRICO

### A. DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA:

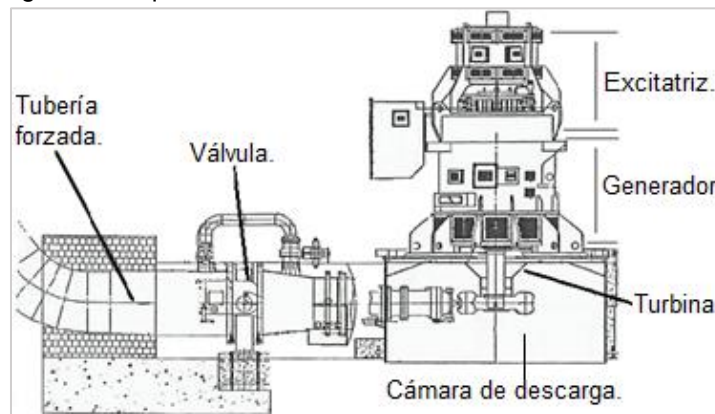
La central hidroeléctrica es una instalación que genera electricidad, por medio de un recurso renovable, específicamente el agua, Este tipo de generadoras han sido las más aplicables en el campo de las energías renovables, esto se debe a que abastecen de energía a un costo no muy elevado.

#### 1. Principio de funcionamiento:

La central hidroeléctrica puede aprovechar el caudal de dos distintas maneras, la primera es mediante un embalse de captación (presa) situado a un nivel más alto que el centro de operaciones, este permite almacenar el agua y utilizarla regulablemente según lo requiera la demanda. La segunda es llamada por agua fluyente, esta permite obtener el fluido hidráulico directamente del cauce del río, sin contar con una reserva de agua.

La central hidroeléctrica a la cual se realiza este estudio es de tipo embalse, permite regular los caudales, operando durante todo el año, este tipo de central aprovecha la diferencia de elevación entre un embalse y el centro de operaciones situado en terreno más bajo.

Figura 1. Esquema de construcción de la central hidroeléctrica.



Fuente: Andritz Hydro, Plano dimensional de disposición de la turbina, (2012:1).

La Figura 1, muestra el esquema de construcción de la central a la que se le realiza el estudio.

El agua es regulada mediante la presa, esta es redirigida mediante una tubería forzada de alta y baja presión, antes que la energía potencial del agua llegue a la turbina, se encuentra instalada una válvula principal dentro de la casa de máquinas, que permite controlar la entrada de flujo deseado. El agua transforma su energía potencial en energía cinética adquiriendo velocidad en la tubería de caracol de la turbina instalada, su energía actúa sobre los cangilones del rodete haciéndolo girar, de esta manera la energía cinética es transformada a mecánica permitiendo girar el generador y convirtiendo finalmente su energía mecánica a eléctrica.

El agua después de actuar sobre los cangilones del rodete de la turbina, cae a la cámara de descarga que permite redirigirla nuevamente al caudal del río, siguiendo su curso normal.

Esta planta entró en operación en el año 2014, con la finalidad de suplir de energética a la red eléctrica del país. Tiene una capacidad de generación de 2.23 MW de potencia.

## **B. GENERALIDADES DE LOS COMPONENTES DE LA CENTRAL DE ENERGÍA:**

Esta planta consta de varias obras y elementos, los cuales en conjunto forman la central de energía, esta es dividida en dos grupos:

El primero lo componen las estructuras y equipos. Estas tienen la función principal de almacenar y derivar el caudal, lo conforma un embalse para regulación diaria, una tubería de conducción de alta densidad y una tubería de alta presión.

El segundo grupo contiene las instalaciones que se encargan de transformar la energía mecánica a eléctrica, es llamada casa de máquinas y concentra los equipos electromecánicos y una subestación tipo elevadora para poder entregar la energía al sistema nacional interconectado, a través de línea de transmisión, esta última se encuentra en el perímetro de la central, alejada del centro de operaciones.

### **1. Componentes de la central hidroeléctrica:**

A continuación, se describen los componentes, que conforma la central hidroeléctrica a la que se realizó el estudio:

#### **a. Obras y elementos:**

##### **1) Embalse para regulación diaria:**

Es conformada por una presa, esta es una estructura que está localizada sobre el río, a un nivel más alto que el centro de máquinas, es utilizada de barrera para impedir el curso normal del agua en el caudal del río, su objetivo es almacenar y elevar su embalse con el fin de controlar el empleo del agua, de este modo darle una utilización eficiente durante las horas de mayor demanda correspondientes a la hora pico, está es derivada mediante tuberías de conducción hacia la central.

El volumen del embalse es de 36,388.58 m<sup>3</sup> (treinta y seis mil trescientos ochenta y ocho punto cincuenta y ocho metros cúbicos), su altura es de 10.50 m, el uso del embalse es para regulación diaria.

La captación de agua está construida por gaviones y forro de concreto estructural por gravedad, con un vertedero de sección de 7.00 m de alto, una longitud de 16.50 m y longitud total aproximada de 34.00 m.

## 2) Obra de toma:

Estructura que permite tomar el flujo de agua necesario para generar energía, deriva gradualmente el agua a las tuberías, su función es impedir el paso de cualquier material sólido que traiga el caudal.

## 3) Chimenea de equilibrio:

Esta estructura está instalada después de la presa y próxima a la central, es la encargada de regular la energía en la conducción del caudal, absorbe las sobrepresiones causadas por el cierre de una válvula en la tubería, evitando el daño de las mismas.

Esta chimenea contiene una reserva de agua que permite acelerar o disminuir el agua de la tubería, dependiendo lo que la turbina requiera.

Está construida una línea de tubería PVC de 20" de diámetro, la cual se ubica en la parte alta de la tubería de presión.

## 4) Canales de derivación, tuberías de alta densidad y alta presión:

Es utilizado de medio de transporte para conducir el agua hasta la turbina de la central, el agua se desplaza por la acción de la presión y no por la pendiente, por ello es que la entrada a la turbina es por conducción forzada. La tubería forzada soporta la presión y sobrepresión que produce la columna de agua.

Estas tuberías transmiten el agua en presiones variables, están construidas de acero para soportar los cambios de presión que pueden generar daños en la estructura.

**a) Tubería de baja presión:** Utiliza un canal de riego existente que mide 3,530 metros de longitud. Está construida con refuerzo de acero y montada sobre bases de concreto, tiene una longitud de 4780 m.

**b) Tubería de alta presión:** Este tramo consta de 364 metros de longitud con un diámetro de 762 mm/30" y un espesor de 0.344" (11/32") de pulgada.

## 5) Cuarto de máquinas:

Es el centro de operaciones donde se concentran los equipos electromecánicos y de control responsables de la generación de energía.

La marca de los equipos electromecánicos con la cual se trabaja son de la empresa Andritz, proveniente del país de Francia.

Es de tipo convencional construida de concreto reforzado en un área de 142.80 m<sup>2</sup>. Diseñada con una superestructura de acero de alma llena.

**b. Equipo electromecánico:**

La mayoría de estos equipos se encuentran localizados dentro del cuarto de máquinas, son los elementos más importantes para la generación y transformación de la energía eléctrica:

**1) Turbina:**

Entre los equipos electromecánicos, la turbina es el elemento que aprovecha la energía cinética y potencial del agua, que, transferido mediante un eje al generador, produce energía eléctrica.

La central hidroeléctrica cuenta con una turbina de expansión tipo Pelton de eje vertical, se caracteriza por tener una caída de gran altura y un caudal pequeño, su altura aproximada es de 120 m desde la presa hasta la casa de máquinas, tiene una capacidad de hasta 2000 kW, con eficiencia de 90.9 %, tiene un rodete integrado de una sola pieza que permite aprovechar la expansión del volumen del agua al pasar por una cámara de admisión en forma de caracol, la turbina está diseñada para el flujo de  $2.14 \text{ m}^3/\text{s}$ .

**2) Máquina sincrónica o generador:**

El generador junto a la turbina, llegan a ser los elementos más importantes dentro de cualquier central hidroeléctrica. Esta es una máquina sincrónica rotativa, que básicamente transforma la energía mecánica de la turbina en energía eléctrica, basando su función en el principio de inducción electromagnética establecida por Michael Faraday.

Refiriéndonos al principio de inducción electromagnética basada en la ley de Faraday-Lenz descrita en el libro principio de electricidad y electrónica II (1999:80) dice:

«La F.E.M. (fuerza electro motriz), inducida en un circuito está relacionada con la variación en el tiempo del flujo magnético a través del circuito, y se opone a la causa que la produjo.»

Esto quiere decir que al mover un conductor eléctrico rápidamente en el núcleo de un campo magnético se inducirá una tensión eléctrica en los extremos de dicho conductor.

El generador síncrono instalado en la central de generación, tiene una capacidad de 2400 kVA, una velocidad de 514 r.p.m., una salida de 480 V, corriente de 601 A, de tres fases, con frecuencia de 60 Hz, su corriente de excitación es de 51 A, mientras que su voltaje de excitación es de 125 V.

La energía generada por este equipo es transportada por medio de líneas de electricidad hacia la subestación, donde se encuentra el transformador elevador.

### **3) Sistema de control:**

Proporciona a los operadores información en tiempo real de las condiciones eléctricas, mecánicas e hidráulicas de los sistemas que se encuentran en el cuarto de máquinas y en sus otras áreas.

Se utiliza el sistema "SCADA" para supervisar y controlar la generación de energía, este sistema también permite adquirir todos los datos y parámetros durante el proceso.

Tiene un controlador lógico programable (PLC) Siemens TM1703 ACP y un conmutador (switch) de comunicación ethernet marca Siemens RUGGEDCOM RS900, utilizado para conectar múltiples señales de red y distribuir datos de un segmento a otro. Este sistema permite monitorear distintos factores; análisis de alarmas para identificar las fallas y supervisión de variables, verificando constantemente niveles de presión, temperatura, tensión y corriente.

### **4) Subestación elevadora:**

Su objetivo es transformar y distribuir la energía eléctrica al sistema nacional interconectado, a través de la red de transmisión.

Se encuentra en el perímetro de la central hidroeléctrica a una distancia aproximada de 60 m desde el cuarto de máquinas, sirve para elevar la tensión a niveles en los que resulte económica la transmisión de la energía. Está provista por un banco de transformadores de 2000 kVA, 480/13.8 kV, diseñados de acuerdo a las características del generador, contiene dos interruptores de potencia para sincronizar las unidades con la red de transmisión y dos tableros de conexión para los equipos auxiliares de la planta.

## **C. GENERALIDADES SOBRE EL MANTENIMIENTO INDUSTRIAL:**

Una de las actividades importantes para mantener una empresa en constante funcionamiento y que le permita estar en un alto nivel de competitividad es la realización de un mantenimiento adecuado dentro de sus instalaciones, el cual debe de estar bien estructurado, permitiendo cumplir con los objetivos y metas propuestas por la empresa.

### **1. Definición del mantenimiento:**

El mantenimiento se refiere a realizar distintas actividades o acciones que permiten alargar o cumplir la vida útil de los equipos e instalaciones, evitando su degradación.

Según Santiago García (2009-2012:1), el mantenimiento es un conjunto de técnicas, destinadas a conservar equipos e instalaciones industriales en servicio durante el mayor tiempo posible y con el máximo rendimiento.

La norma Covenin 3049, definida en la normativa venezolana (2001:1) dice:

«Conjunto de acciones que permite conservar o restaurar un sistema productivo a un estado específico, para que pueda cumplir un servicio determinado.»

En la opinión acerca del mantenimiento, Newbrough (1998:20) dice:

«Es la actividad humana que conserva la calidad del servicio que prestan las máquinas, instalaciones y edificios en condiciones seguras, eficientes y económicas, puede ser correctivo si las actividades son necesarias debido a que dicha calidad del servicio ya se perdió y preventivo si las actividades se ejecutan para evitar que disminuya la calidad del servicio.»

Estas distintas posturas llevan a definir que el mantenimiento es un conjunto de actividades que busca garantizar que un equipo, sistema productivo o instalación trabaje en óptimas condiciones cumpliendo las funciones que están destinadas a realizar, garantizando la calidad del servicio prestado y de este modo poder ser competentes en el mercado designado.

## **2. Objetivos del mantenimiento industrial:**

Los objetivos más comunes del mantenimiento basándose en Nava, A. (2006:35), son:

- a. Disminuir la gravedad de las fallas que no se lleguen a evitar.
- b. Evitar detenciones inútiles o parada de máquinas.
- c. Evitar accidentes.
- d. Evitar incidentes y aumentar la seguridad para las personas.
- e. Conservar los bienes productivos en condiciones seguras y preestablecidas de operación.
- f. Balancear el costo de mantenimiento con el correspondiente al lucro cesante.
- g. Alcanzar o prolongar la vida útil de los bienes.

Se puede decir que todos estos objetivos conllevan a evitar y disminuir las fallas mediante la aplicación correcta del mantenimiento, garantizando así la seguridad de las personas encargadas y el trabajo continuo sin paradas imprevistas, todo esto de la mano para obtener ganancias para la organización y para los colaboradores.

Según Cuartas (2008:1), los objetivos del mantenimiento se basan en reducir los costos de producción y garantizar la seguridad industrial.

## **3. Tipos de mantenimiento:**

Actualmente existen distintos modelos de mantenimiento que las empresas industriales aplican para mantener en óptimas condiciones sus instalaciones y procesos productivos. Estos sistemas no solamente se centran en corregir los fallos, sino que su función es anticiparse a los mismos.

A continuación, con fines formativos, se explicarán las distintas divisiones de mantenimiento:

- a. Mantenimiento correctivo.
- b. Mantenimiento preventivo.
- c. Mantenimiento predictivo.
- d. Mantenimiento productivo total.

**a. Mantenimiento correctivo:**

Según Nava (2006:15), el mantenimiento correctivo se expresa como una actividad para corregir una falla después de un paro imprevisto, siendo sus características presencia de un carácter urgente y la necesidad de una solución inmediata para evitar pérdidas de tiempo, producción y dinero.

Lo anterior descrito se refiere a que este tipo de mantenimiento es realizado con urgencia, no tiene programación solo se da para cubrir un fallo imprevisto en algún equipo o maquinaria, debe de ser reparado lo antes posible, puede ocasionar la interrupción de un proceso en específico o una parada total en la empresa.

Este sistema tiene de inconvenientes disponer de un stock de repuestos y un capital importante, para poder dar asistencia en el momento en que ocurre la falla.

Otro inconveniente que se hace presente, es que los fallos imprevistos pueden causar daños a otros elementos o piezas que estén interconectadas y en estado óptimo.

**b. Mantenimiento preventivo:**

Este modelo de mantenimiento se enfoca en el conjunto de actividades programadas, la finalidad es anticiparse a los fallos, de esta manera se logra minimizar los problemas ocasionados de forma imprevista.

La planificación de este modelo de mantenimiento, descrita por Muñoz (2007:6) dice:

- 1) Definir que equipos o elementos serán objetos de este mantenimiento.
- 2) Establecer la vida útil de los mismos.
- 3) Determinar los trabajos a realizar en cada caso.
- 4) Agrupar los trabajos según época en que deberán efectuarse las intervenciones.

Para poder realizar lo anteriormente descrito, es necesario requerir de un alto nivel de planificación que permita definir las rutinas que se implementarán, es decir que para ello debemos de calendarizar, definir y agrupar cada actividad y trabajo de mantenimiento que se debe de realizar a cada equipo, instalación o sistema productivo.

**c. Mantenimiento predictivo:**

Este modelo de mantenimiento es utilizado para detectar síntomas en los equipos que están propensos a sufrir un futuro fallo.

Se realizan actividades de seguimiento y monitorización para determinar el estado de los equipos. Esto permite planificar anticipadamente una intervención. El seguimiento y la monitorización se realiza por medio de la identificación de variables físicas, Por ejemplo: estudio de vibraciones, análisis de aceite, temperaturas, presiones, velocidades, ruidos, etc.

#### **d. Mantenimiento productivo total:**

Este mantenimiento se originó en Japón, con la finalidad de asegurar al máximo la funcionalidad de las empresas, manteniendo los equipos en un estado óptimo y disponible para una producción sin paradas no programadas, garantizando así una producción continua.

Según Nakajima (1993), el mantenimiento productivo total se define como el sistema de mantenimiento enfocado hacia una mejora continua del proceso productivo y que involucra la participación de todos los trabajadores hacia la óptima disponibilidad de las máquinas.

Esto quiere decir que todos los integrantes de la empresa u organización deben de trabajar conjuntamente en grupos, para lograr una mayor eficiencia, la meta es tener cero perdidas en todas las áreas y departamentos.

#### **D. ESTABLECIMIENTO DEL TIPO DE MANTENIMIENTO:**

La guía de mantenimiento que se presenta es de tipo preventiva y está centrada específicamente a los sistemas principales de la central de energía, que son la turbina y el generador. Se consideran y toman en cuenta todos los elementos y componentes que conforman cada sistema, desde partes del sistema mecánico y eléctrico.

##### **1. Gestión del mantenimiento:**

El diseño de esta guía de mantenimiento está basado en la recopilación de datos del historial de disparos de la central, de esta manera se identifican todos los fallos presentados.

La programación y revisión de los equipos que fueron tomados en cuenta en el diseño de este mantenimiento están enfocados en la realización de mantenimientos mayores y menores, indicado por el administrador de mercado mayorista (AMM).

Se propone realizar tres mantenimientos al año, dos de ellos menores y uno mayor, estos se realizan durante la temporada de invierno, debido que el caudal del río viene con exceso de sedimentos que provocan la estanqueidad en las tuberías, vertimientos (fugas) y exceso de suciedad en la turbina. La Tabla 1, indica la clasificación en la que se divide la programación del mantenimiento.

Tabla 1. Clasificación del mantenimiento programado.

| <b>Mantenimiento no.</b> | <b>Temporada.</b>         | <b>Tipo.</b> | <b>Mes.</b> | <b>Duración en días.</b> |
|--------------------------|---------------------------|--------------|-------------|--------------------------|
| 1.                       | Inicio de invierno.       | Menor.       | Mayo.       | 1 – 2                    |
| 2.                       | Mitad de invierno.        | Menor.       | Agosto.     | 1 – 2                    |
| 3.                       | Finalización de invierno. | Mayor.       | Octubre.    | 3 – 4                    |

Fuente: Elaboración propia.

La realización de la guía se basa en los mantenimientos mencionados anteriormente en la Tabla 1, se programaron actividades semanales y mensuales, pero estas serán llevadas a cabo mientras la central este en operaciones, es decir que esté generando energía eléctrica.

Se explican e identifican las medidas de seguridad personal, mediante la realización de un plan seguro de trabajo, que deben de tomar los encargados en la realización de cada mantenimiento, antes, durante y después del proceso de mantenimiento. También se identificaron los repuestos correspondientes a cada equipo y las herramientas necesarias para poder facilitar los trabajos de mantenimiento.

## E. IDENTIFICACIÓN DE LOS EQUIPOS:

A continuación, se presenta la identificación y descripción técnica de los equipos y componentes, que conforman la guía de mantenimiento.

Tabla 2. Lista de máquinas de los equipos que conforman este estudio.

| No. | Equipo.                             |
|-----|-------------------------------------|
| 1.  | Turbina.                            |
| 2.  | Válvula principal de entrada.       |
| 3.  | Unidad de presión hidráulica (HPU). |
| 4.  | Generador y excitatriz.             |

Fuente: Elaboración propia.

### 1. Sistema de la turbina:

Esta central hidroeléctrica cuenta con una turbina tipo Pelton de eje vertical, con rodete alimentado por 6 inyectores o boquillas, tiene una velocidad nominal de 450 r.p.m. bajo la caída útil de 105 m. con una potencia de placa de 2037 kW. La Tabla 3, indica la descripción técnica de la turbina Pelton montada en la central hidroeléctrica.

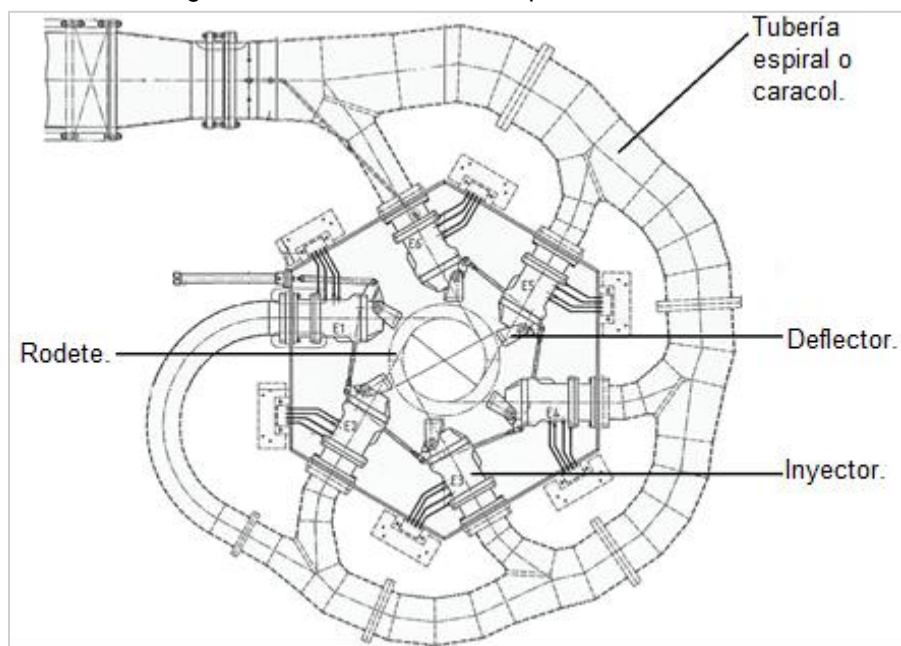
Tabla 3. Descripción técnica de la turbina Pelton.

| Descripción técnica.    |          |                    |
|-------------------------|----------|--------------------|
| Marca.                  | Andritz. | -                  |
| Cantidad.               | 1        | -                  |
| Salida nominal.         | 2037     | kW.                |
| Caída nominal.          | 105      | m.                 |
| Descarga nominal.       | 2.2      | m <sup>3</sup> /s. |
| Velocidad nominal.      | 450      | r.p.m.             |
| Velocidad desenfrenada. | 809      | r.p.m.             |
| Número de inyectores.   | 6        | -                  |
| Número de deflectores.  | 6        | -                  |

Fuente: Central hidroeléctrica estudiada, Planilla de datos de la turbina Pelton (2014:1).

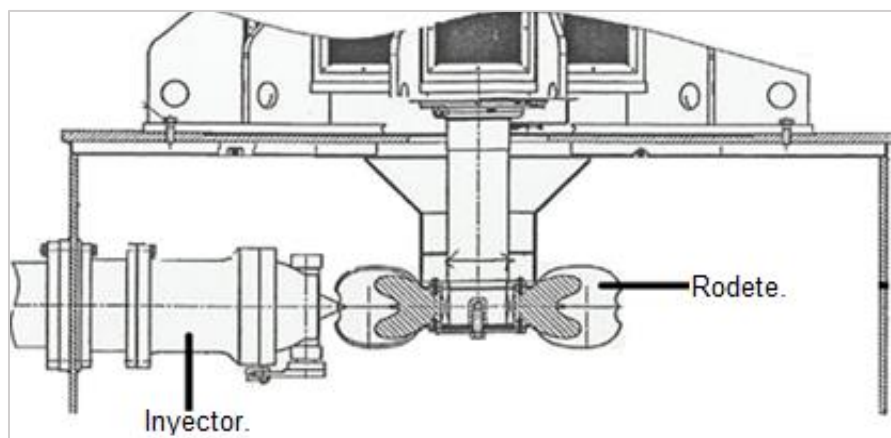
En las Figuras 2 y 3 se muestran las partes que componen la turbina Pelton instalada en la central hidroeléctrica:

Figura 2. Partes de la turbina tipo Pelton instalada.



Fuente: Andritz Hydro, Plano dimensional de la turbina Pelton, (2013:1).

Figura 3. Esquema del rodete y el inyector de la turbina Pelton instalada.



Fuente: Andritz Hydro, Plano dimensional de la turbina Pelton, (2013:1).

Para tener una mejor identificación de los componentes de este sistema, se dividió en dos grupos, el primero cuenta con los mecanismos principales del equipo y el segundo con los auxiliares que necesita la turbina para su funcionamiento óptimo.

**a. Componentes del equipo principal:**

**1) Tubería espiral o Caracol:**

Es el ducto circular que sirve para transportar el agua necesaria hacia el rodete. Su tubería está conectada a los seis inyectores que alimentan el mismo y lo hacen girar, esta tubería espiral se encuentra instalada dentro de una estructura de hormigón.

**2) Inyector o boquilla:**

La turbina instalada consta de seis inyectores o boquillas de 132 mm de diámetro, estos son los encargados de generar chorros de agua que van dirigidos al rodete para hacerlo girar, constan de una válvula de aguja cuyo desplazamiento lineal determina el nivel de apertura o cierre, regulando el flujo del caudal turbinado, son capaces de adaptarse a una nueva carga.

Figura 4. Inyector de la turbina Pelton instalada.

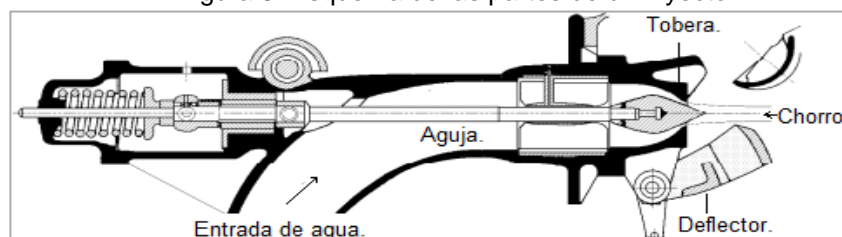


Fuente: Imagen captada en central hidroeléctrica estudiada, Área de cámara de desfogue.

Cada inyector está compuesto por tres elementos (ver Figura 5):

- a) **Aguja:** Es de acero inoxidable, lo compone un vástago que se encuentra situado en el interior de la tobera, este permite darle un movimiento longitudinal, logrando regular el caudal.
- b) **Tobera:** Boquilla con orificio que está instalada en la terminación de la cámara de distribución, dirige el chorro de agua hacia el término del rotor.
- c) **Deflector:** Dispositivo de seguridad que se encarga de bloquear el flujo del agua, en caso de variación de carga o velocidad. Estos trabajan sincrónicamente, están conectados entre sí, mediante un dispositivo de articulación con varillaje de regulación que es movida por un cilindro hidráulico exclusivo para la apertura y cierre de los deflectores.

Figura 5. Esquema de las partes de un inyector.



Fuente: P. Fernández Diez, (2009:37).

### 3) Rodete:

Es el encargado de generar la potencia al eje de la turbina, girando mediante una fuerza impulsora, que es generada por chorros de agua provenientes de los inyectores.

Está forjado en una sola pieza, monobloque de acero inoxidable al cromo níquel y posteriormente fresado en máquina, cuenta con 19 pares de cangilones o álabes que están soldadas en el disco, está diseñado para el flujo de  $2.14 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Figura 6. Rodete tipo Pelton.

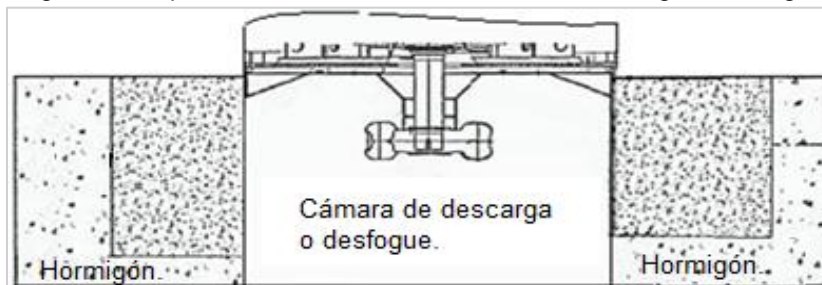


Fuente: Imagen captada en casa de máquinas de central hidroeléctrica estudiada.

### 4) Cámara de descarga:

Es la zona construida de hormigón que alberga la turbina y por donde el agua cae libremente hacia el desagüe siguiendo su curso en dirección al caudal del río.

Figura 7. Esquema del diseño de la cámara de descarga o desfogue.



Fuente: Andritz Hydro, Plano dimensional de disposición de la turbina Pelton, (2012:1).

#### b. Componentes auxiliares:

##### 1) Unidad de presión hidráulica (HPU):

Equipado con dos bombas AC cuya potencia nominal es de 80 bar, un acumulador de presión tipo nitrógeno, bloque de válvulas de control de instrumentos y un tanque hidráulico con capacidad de 190 litros. La distribución de aceite se realiza mediante tuberías rígidas de acero inoxidable.

Su función principal es suministrar energía hidráulica (aceite) para maniobrar los dispositivos de ajuste que componen la turbina, específicamente los inyectores y deflectores, también el funcionamiento de la válvula principal de entrada.

Figura 8. Unidad de presión hidráulica instalada.



Fuente: Imagen captada en casa de máquinas de central hidroeléctrica estudiada, área del HPU.

## 2) Válvula principal de entrada:

Permite o bloquea el paso del flujo de agua de la tubería de presión a la tubería de caracol, consta de una tubería de bypass, que permite el equilibrio de las presiones en ambas tuberías, antes de la apertura de la válvula principal.

Es una válvula tipo mariposa con eje en posición horizontal, su apertura es controlada a través de un actuador hidráulico (cilindro de doble efecto), este consiste en un pistón que debido a la presión del aceite realiza un movimiento lineal. La apertura total de la válvula se obtiene cuando el cilindro hidráulico está completamente extendido.

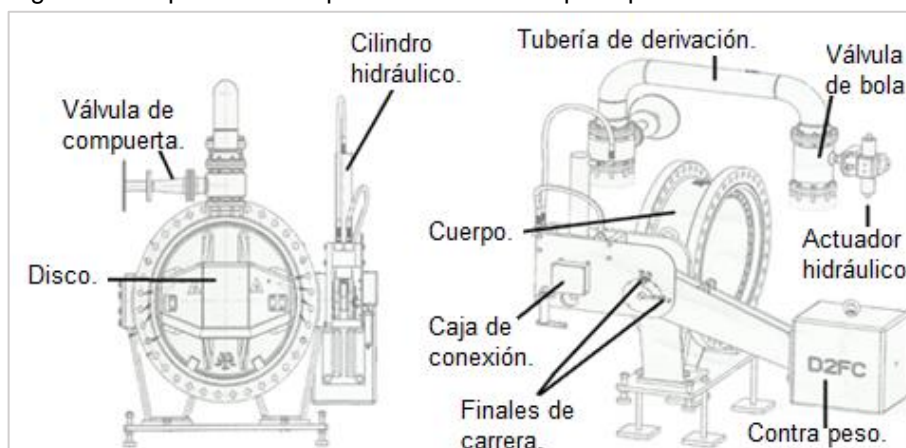
La válvula está diseñada para cerrar sin ninguna energía externa, debido al contra peso. La secuencia de cierre comienza cuando inicia a liberarse presión desde la cámara posterior del cilindro hidráulico. El contra peso cae lentamente hasta llegar a su posición totalmente cerrada. Este sistema está diseñado para cerrar en condiciones de flujo total.

La velocidad de cierre define el diámetro del orificio calibrado en el cilindro hidráulico. El tiempo de cierre de la válvula debe ser controlado en seco, antes de llenar de agua la tubería en presión.

Tiene un diámetro nominal de 900 mm, con presión nominal de 14 bar, es de dos posiciones, abierta que permite el paso del flujo continuo y cerrada que aísla completamente el paso hacia la turbina Pelton.

A continuación, la Figura 9 indica los elementos que componen la válvula tipo mariposa y su descripción.

Figura. 9. Esquema de las partes de la válvula principal de entrada instalada.



Fuente: D2FC, Plano dimensional de la válvula mariposa, (2013:1).

- a) **Cilindro hidráulico de doble efecto:** Mecanismo que recibe el fluido hidráulico proveniente de la unidad de presión y lo transforma en fuerza lineal para mover el disco y conseguir la posición exacta de la válvula, ya sea abierta o cerrada.
- b) **Contra peso:** Bloque de acero cuya masa es de 1153 kg, permite el cierre de manera segura y rápida de la válvula, evitando contrapresiones que dañen la turbina.
- c) **Actuador hidráulico del bypass:** Dispositivo que controla una válvula de bola en la tubería de derivación, en caso de variaciones en la presión este recibe una señal emitida por un presostato instalado en la tubería de presión, que permite activar el contrapeso para un cierre instantáneo y seguro.
- d) **Tubería de derivación (bypass):** Conformada por una válvula de accionamiento automático y una válvula de compuerta manual que permiten regular las presiones en ambos lados de la tubería de presión.

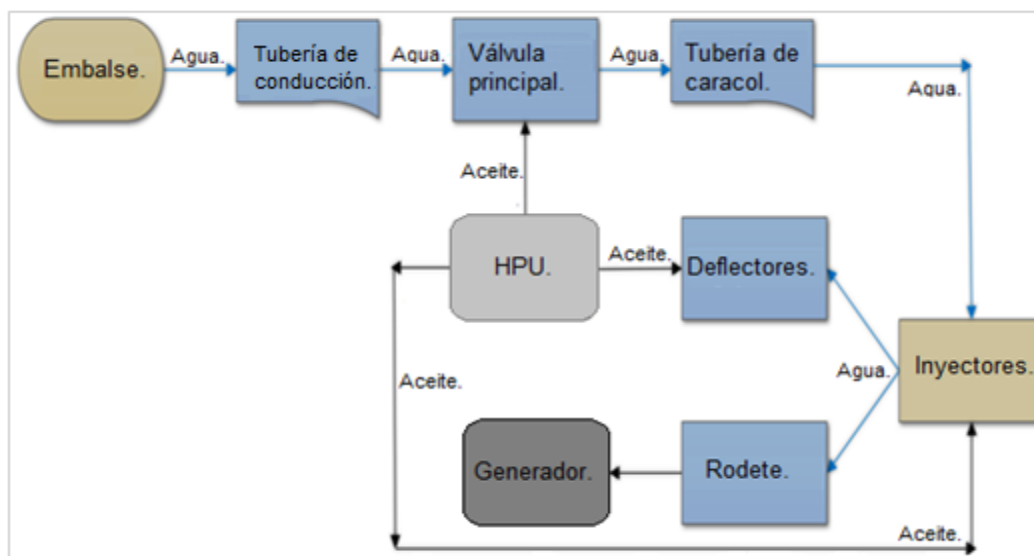
Figura 10. Válvula principal de entrada instalada.



Fuente: Imagen captada en casa de máquinas de central hidroeléctrica estudiada.

### c. Principio de funcionamiento:

Figura 11. Principio de funcionamiento del sistema turbinado.



Fuente: Elaboración propia.

La Figura 11, indica por medio de un diagrama de flujo el principio de funcionamiento del sistema de la turbina de manera resumida.

Inicialmente el agua se encuentra en la cámara de captación, este flujo es derivado a la válvula principal de entrada mediante canales de tuberías de presión, que van dirigidos al sistema turbinado. Mediante la tubería espiral el agua es redirigida a 6 inyectores que regulan el flujo del caudal y por medio de energía cinética hacen girar el rodete. El sistema turbinado cuenta con una unidad de potencia hidráulica (HPU), esta tiene la función de activar o desactivar la válvula principal, los deflectores de seguridad y los inyectores.

## 2. Sistema Máquina Síncrona (Generador):

El generador es de eje vertical, es una máquina síncrona de tres fases, marca Weg, fabricado en Brasil, este equipo se encuentra instalado en la casa de máquinas, tiene velocidad nominal de 450 r.p.m. y frecuencia de 60Hz.

Tabla 4. Nomenclatura del modelo del generador síncrono SPA 800.

| Descripción.              | Nomenclatura. | Características.                         |
|---------------------------|---------------|--|
| Línea del generador.      | S.            | Pertenece a la línea S.                  |
| Brushless, Excitación.    | P.            | Generador con excitatriz auxiliar.       |
| Sistema de refrigeración. | A.            | Abierto autoventilado.                   |
| Carcasa.                  | 800.          | Altura de la punta de eje en milímetros. |

Fuente: Weg, Planilla de datos de máquina síncrona, hydro Generador, (2014:2).

La Tabla 4, describe el modelo Spa 800 del generador instalado en la central, haciendo referencia a la explicación de cada nomenclatura del mismo, identificando sus características según el fabricante del equipo.

La siguiente Tabla describe las características técnicas que posee el generador síncrono que está instalado en la central hidroeléctrica a la que se le realizó el estudio.

Tabla 5. Descripción técnica de generador síncrono instalado.

| <b>Descripción técnica.</b> |                     |      |
|-----------------------------|---------------------|------|
| Marca.                      | Weg                 | -    |
| Cantidad.                   | 1                   | -    |
| Modelo.                     | SPA 800             | -    |
| Potencia.                   | 2265                | kVA. |
| Tensión nominal.            | 4160                | V.   |
| Corriente nominal.          | 314.3               | A.   |
| Polos.                      | 16                  | -    |
| Frecuencia                  | 60                  | Hz.  |
| Conexión del estator.       | Y                   | -    |
| Excitación.                 | Brushless PMG       | -    |
| Maquina accionante.         | Turbina hidráulica. | -    |
| Sentido de giro.            | Anti horario.       | -    |

Fuente: Weg, Planilla de datos de máquina sincrónica, generador (2013:1).

El sistema de generación se divide en dos partes que son maquina sincrónica y de excitatriz. Las partes principales que los conforman son las siguientes.

#### **a. Máquina sincrónica:**

##### **1) Estator principal:**

Se encuentra internamente en el generador, su función es generar un campo magnético producido por una bobina construida con alambre circular de cobre.

Está conformada por una carcasa diseñada para darle resistencia a las vibraciones y así evitar desperfectos al bobinado. La bobina que tiene el estator es de tres fases, para tener una buena rigidez, aislamiento dieléctrico y para mayor seguridad está sometida al sistema epoxi VPI.

##### **2) Rotor principal:**

Junto con el estator son las partes más importantes para la transmisión de potencia en el generador. Esta es la parte rotativa que se impregna al vacío, para garantizar la rigidez mecánica y eléctrica. Este rotor es de tipo polos salientes, contiene 16 de ellos. Contiene un circuito magnético de menor espesor que las del estator principal, formado por paquetes de placas y un eje fabricado en una sola pieza.

### 3) Cojinetes:

La unidad generadora tiene dos cojinetes uno inferior y otro superior, que sirven de apoyo, guía y para sostener el peso en el eje rotativo, estos cojinetes son de tipo deslizamiento, proveen mayor durabilidad, permiten periodos de lubricación mayores y la superficie de lubricación de estos por ser respectivamente grandes amortigua la vibración.

Tabla 6. Características de los cojinetes del generador síncrono.

| Características.   |          |        |
|--------------------|----------|--------|
| Descripción.       | Función. | Tipo.  |
| Cojinete inferior. | Guía     | NU1052 |
| Cojinete superior. | Empuje.  | 29348  |

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 6, anteriormente descrita explica cuál es el número o código perteneciente a cada cojinete del generador vertical, también indica cuál es su función dentro del mismo, el cojinete inferior funciona de guía para acoplamiento con la turbina y el superior le da ese soporte de empuje para que el eje este alineado y acoplado correctamente.

La Figura 12, indica de manera ilustrativa la posición en donde se encuentra instalado el cojinete superior e inferior en el generador o maquina síncronica.

Figura 12. Esquema de posición de cojinetes del generador síncrono.



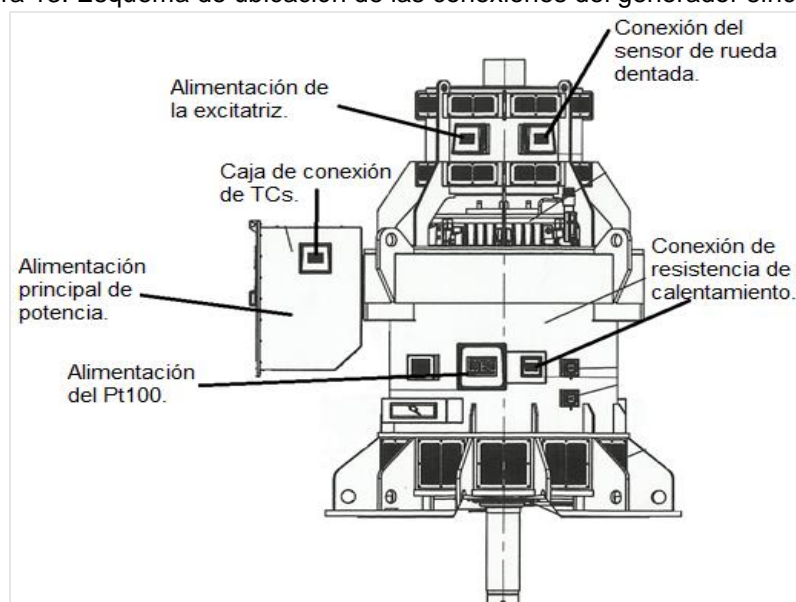
Fuente: Weg, plano dimensional de la máquina síncronica, (2013:1).

### 4) Cajas de conexiones:

Contiene seis cajas de conexiones, tiene una principal que es donde se alimenta la potencia y cinco individuales para alimentar distintos componentes, en la siguiente Tabla se identifican cada una de ellas.

A continuación, se muestra en la Figura 13, un esquema que indica la ubicación de las distintas conexiones que tiene la maquina síncronica, seguida por la Tabla 6, que describe brevemente cada una de ellas.

Figura 13. Esquema de ubicación de las conexiones del generador síncrono.



Fuente: Weg, plano dimensional de la máquina síncrona, (2013:1).

Tabla 7. Descripción de conexiones del generador síncrono.

| Caja de conexiones: |                             |   |
|---------------------|-----------------------------|---|
| No                  | Nombre.                     | Descripción.                                |
| 1.                  | Caja de conexión principal. | Alimentación de potencia generador.         |
| 2.                  | Caja de conexión 1.         | Sensor de temperatura (PT100).              |
| 3.                  | Caja de conexión 2.         | Sensor (velocidad) de la rueda dentada.     |
| 4.                  | Caja de conexión 3.         | Alimentación de la Excitatriz.              |
| 5.                  | Caja de conexión 4.         | Resistencia de calentamiento del generador. |
| 6.                  | Caja de conexión 5.         | Transformador de corriente (TCs).           |

Fuente: Weg, plano dimensional de la máquina síncrona, (2013:1).

### 5) Freno:

El sistema de accionamiento hidráulico contiene pastillas de freno cuya función es crear fricción con el disco y ralentizar la rotación para detener por completo el giro del generador. el desenfreno se produce por muelle de retorno, la señalización de posición se da por medio de sensores inductivos, sus luces LED se encienden cuando la pastilla retrocede (freno desacoplado).

Se encuentra situado en la parte inferior del generador, para tener acceso a este dispositivo es necesario desmontar las rejillas de ventilación.

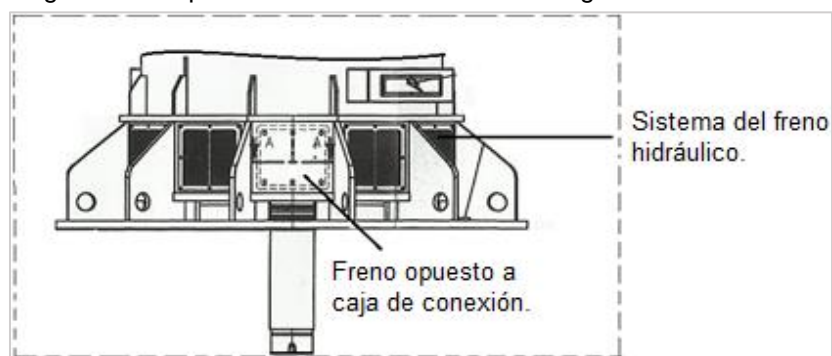
La Tabla 8, da una descripción de sus características y en la Figura 14, podemos observar un esquema que indica su posición en el generador.

Tabla 8. Descripción técnica del freno del generador síncrono.

| Descripción.                | Características.                    |
|-----------------------------|-------------------------------------|
| Modelo.                     | Accionamiento hidráulico.           |
| GD2 total.                  | 4664 kgf.m <sup>2</sup>             |
| Inicio de freno automático. | 135 r.p.m. (30% velocidad nominal). |
| Tiempo de frenado.          | 180 s.                              |
| Cantidad.                   | 1.                                  |
| Presión.                    | 5.96 bar.                           |

Fuente: Weg, plano dimensional de la máquina síncrona, (2013:1).

Figura 14. Esquema de ubicación del freno del generador síncrono.



Fuente: Weg, plano dimensional de la máquina síncrona, (2013:1).

#### b. Excitatriz del generador:

La función principal consiste en proveer corriente directa al bobinado del estator de la máquina síncrona. La Figura 15, muestra el tipo de excitatriz instalado en el generador.

Figura 15. Excitatriz del generador instalado.



Fuente: Imagen captada en casa de máquinas de central hidroeléctrica estudiada, Área máquina síncrona.

Lo conforman los siguientes componentes:

**1) Estator de la excitatriz:**

Los polos acomodan bobinas de campo que están conectadas en serie, su función es la de proporcionar el flujo al rotor de la excitatriz. Su alimentación es en corriente continua y está controlado por un regulador de voltaje, mediante la solicitud de carga.

**2) Rotor de la excitatriz:**

Está montado en el eje de la máquina, es laminada y sus ranuras guardan un bobinado conectado en estrella, el punto común de esta conexión es inaccesible.

Es inducido por el flujo del estator de la excitatriz y un voltaje trifásico de corriente alterna (AC).

**3) Excitatriz auxiliar (PMG):**

Llamada también bobina auxiliar, es un generador trifásico de imanes permanentes en el rotor, proporciona suficiente potencia al sistema de regulación automática de voltaje (AVR), para alimentar el campo.

**4) Rectificador de diodos girantes:**

Es un conjunto de diodos rectificadores, este hace parte del circuito de excitación de campo de la máquina síncrona.

La tensión alterna generada por el rotor excitatriz principal es rectificadas a través de estos diodos giratorios y alimenta los polos del rotor principal. Cuando el daño se produce en uno de los diodos giratorios, también es necesario verificar las características de conducción y bloqueo de los otros diodos.

**5) Regulador de voltaje:**

Sistema electrónico que tiene la finalidad de mantener el voltaje constante independiente de carga. Procesa y amplifica las señales de entrada y de control a un nivel y forma apropiada para el controlador.

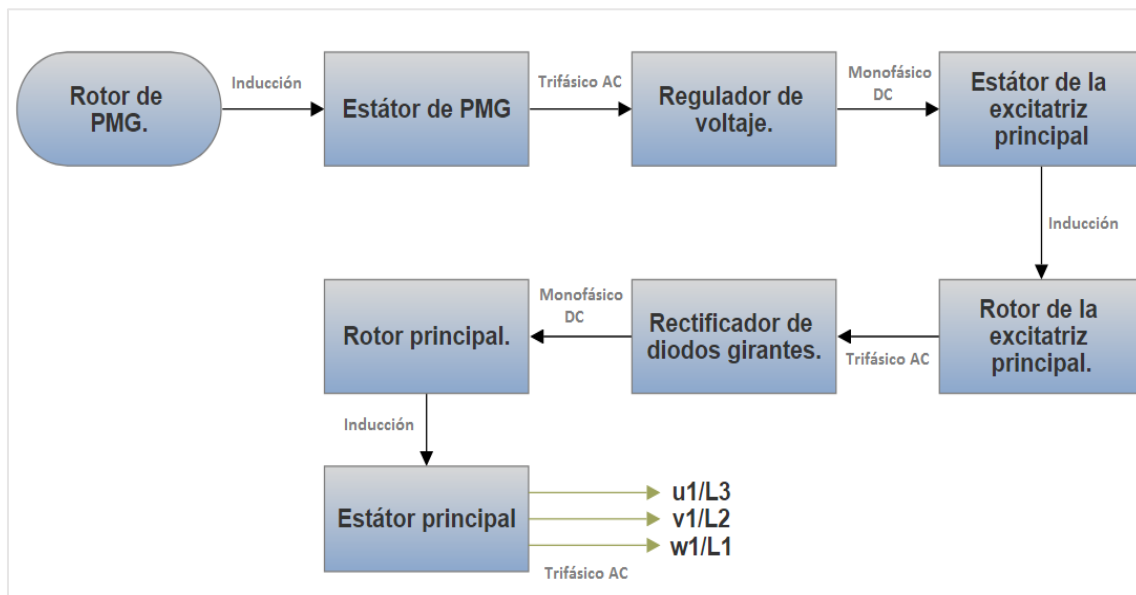
Se realiza mediante un sistema de control de excitación digital, marca Basler Electric, modelo DECS 200. Este dispositivo de control basado en un microprocesador es destinado a controlar la alimentación del generador. Permite regular la tensión, corriente, factor de potencia y la potencia reactiva.

**6) Excitatriz rueda dentada:**

Mediante el giro de la rueda dentada se obtienen por medio de sensores inductivos la velocidad del generador.

### c. Principio de funcionamiento:

Figura 16. Principio de funcionamiento de la maquina sincrónica.



Fuente: Elaboración propia.

El funcionamiento de la unidad generadora con excitación PMG, descrita en el manual de instalación y operación del generador WEG (2014:26), dice:

Al ser accionado por la máquina primaria y cuando alcanza la rotación nominal, se inicia en el generador el proceso de excitación, donde la tensión excitatriz auxiliar alimenta el circuito de potencia del regulador de tensión.

Al ser habilitado el regulador de tensión rectifica esta tensión y alimenta el estator de la excitatriz trifásica principal del generador en corriente continua.

La tensión alterna generada por el rotor de la excitatriz principal es rectificadora a través de los diodos rotativos y alimenta los polos del rotor principal.

La tensión del generador aumenta desde el valor residual hasta la tensión nominal preestablecida y es regulada a través del monitoreo de la tensión de referencia en el regulador electrónico de tensión.

La tensión de referencia para el regulador de tensión debe ser obtenida a través de sensores (TP's) de referencia que deben ser conectados a los terminales principales del generador.

## F. ANÁLISIS DE FALLA:

Los datos utilizados para poder llevar a cabo la realización de este análisis, se tomaron del historial de disparos de la unidad de generación, durante el año 2017 hasta marzo del 2018.

### 1. Identificación de fallas:

A continuación, se muestra el historial de fallas clasificados por mes, la primera columna indica el número de actividad, la segunda, la fecha en que ocurrió el disparo, la tercera y la cuarta la hora de inicio y sincronización, la quinta, el tiempo que se perdió desde que inicio la falla hasta que se sincroniza con la red eléctrica y la última describe brevemente el problema. Cada mes indica el total de horas perdidas procedentes de los disparos que se generaron.

Tabla 9. Historial de fallas del mes de enero del 2017.

| Enero 2017.           |            |          |                      |                           |  |
|-----------------------|------------|----------|----------------------|---------------------------|--|
| No                    | Fecha.     | Hora.    | Hora sincronización. | Tiempo perdido (minutos). | Descripción de falla.  |
| 1.                    | 08/01/2017 | 10:05:00 | 10:16:00             | 00:11:00                  | Interruptor 52L, bajo voltaje.<br>Interruptor 52G, bajo voltaje.                 |
| 2.                    | 08/01/2017 | 10:30:00 | 10:39:00             | 0:09:00                   | Interruptor 52L, bajo voltaje.<br>Interruptor 52G, bajo voltaje.                 |
| 3.                    | 08/01/2017 | 11:08:00 | 11:17:00             | 0:09:00                   | Interruptor 52L, bajo voltaje.<br>Interruptor 52G, alto voltaje y frecuencia.    |
| 4.                    | 08/01/2017 | 11:26:00 | 11:37:00             | 0:11:00                   | Interruptor 52L, bajo voltaje.<br>Interruptor 52G, alto voltaje.                 |
| 5.                    | 08/01/2017 | 11:59:00 | 12:09:00             | 0:10:00                   | Interruptor 52L, sobre corriente.<br>Interruptor 52G, bajo voltaje y frecuencia. |
| 6.                    | 08/01/2017 | 12:25:00 | 12:35:00             | 0:10:00                   | Interruptor 52L, sobre corriente.<br>Interruptor 52G, alto voltaje .             |
| 7.                    | 09/01/2017 | 09:14:00 | 09:38:00             | 0:24:00                   | Interruptor 52L, frecuencia.<br>Interruptor 52G, alto voltaje .                  |
| 8.                    | 15/01/2014 | 14:25:00 | 15:30:00             | 1:05:00                   | Fuga de aceite en cilindro deflector.  |
| 9.                    | 21/01/2017 | 22:20:00 | 22:34:00             | 0:14:00                   | Interruptor 52L, bajo voltaje.<br>Interruptor 52G, alto voltaje.                 |
| 10.                   | 21/01/2017 | 23:25:00 | 23:40:00             | 0:15:00                   | Interruptor 52L, sobre corriente.  |
| <b>Total (horas):</b> |            |          |                      | <b>2:58:00</b>            |  |

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 10. Historial de fallas del mes de febrero del 2017.

| <b>Febrero 2017.</b>  |               |              |                             |                                  |   |
|-----------------------|---------------|--------------|-----------------------------|----------------------------------|---|
| <b>No</b>             | <b>Fecha.</b> | <b>Hora.</b> | <b>Hora sincronización.</b> | <b>Tiempo perdido (minutos).</b> | <b>Descripción de falla.</b>  |
| 1.                    | 10/02/2017    | 12:31:00     | 12:48:00                    | 0:17:00                          | Interruptor 52G, bajo voltaje.                                      |
| 2.                    | 11/02/2017    | 11:18:00     | 11:31:00                    | 0:13:00                          | Interruptor 52G, bajo voltaje.                                      |
| 3.                    | 11/02/2017    | 16:07:00     | 16:18:00                    | 0:11:00                          | Baja presión en tubería de conducción.                              |
| 4.                    | 14/02/2017    | 16:25:00     | 16:36:00                    | 0:11:00                          | Interruptor 52L, sobre corriente.<br>Interruptor 52G, alto voltaje. |
| 5.                    | 20/02/2017    | 08:17:00     | 8:28:00                     | 0:11:00                          | Interruptor 52G, bajo voltaje.                                      |
| 6.                    | 25/02/2017    | 10:13:00     | 10:30:00                    | 0:17:00                          | Perdida de posición en válvula de admisión.                         |
| 7.                    | 25/02/2017    | 13:43:00     | 13:53:00                    | 0:10:00                          | Interruptor 52L, sobre corriente.<br>Interruptor 52G, alto voltaje. |
| <b>Total (horas):</b> |               |              |                             | <b>1:30:00</b>                   |   |

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 11. Historial de fallas del mes de marzo del 2017.

| <b>Marzo 2017.</b>    |               |              |                             |                                  |  |
|-----------------------|---------------|--------------|-----------------------------|----------------------------------|--|
| <b>No</b>             | <b>Fecha.</b> | <b>Hora.</b> | <b>Hora sincronización.</b> | <b>Tiempo perdido (minutos).</b> | <b>Descripción de falla.</b>   |
| 1.                    | 03/03/2017    | 07:23:00     | 12:00:00                    | 4:37:00                          | Interruptor 52L, bajo voltaje.<br>Falla a tierra de estator o rotor. |
| 2.                    | 07/03/2017    | 11:31:00     | 11:49:00                    | 0:18:00                          | Cambio de tap 1 a tap 2 en el transformador de subestación.          |
| 3.                    | 15/03/2017    | 13:38:00     | 14:20:00                    | 0:42:00                          | Interruptor 52L, bajo voltaje.<br>Falla a tierra de estator o rotor. |
| 4.                    | 19/03/2017    | 14:23:00     | 14:35:00                    | 0:12:00                          | Interruptor 52L, sobre corriente.<br>Interruptor 52G, alto voltaje.  |
| 5.                    | 22/03/2017    | 08:30:00     | 8:41:00                     | 0:11:00                          | Interruptor 52L, sobre corriente.<br>Interruptor 52G, alto voltaje.  |
| 6.                    | 22/03/2017    | 10:37:00     | 10:47:00                    | 0:10:00                          | Interruptor 52L, sobre corriente.<br>Interruptor 52G, alto voltaje.  |
| 7.                    | 22/03/2017    | 13:40:00     | 13:50:00                    | 0:10:00                          | Interruptor 52L, sobre corriente.<br>Interruptor 52G, alto voltaje.  |
| 8.                    | 24/03/2017    | 13:17:00     | 13:56:00                    | 0:39:00                          | Interruptor 52L, bajo voltaje.<br>Falla a tierra de estator o rotor. |
| 9.                    | 27/03/2017    | 13:02:00     | 13:48:00                    | 0:46:00                          | Interruptor 52L, Bajo voltaje.<br>Interruptor 52G, alta frecuencia.  |
| <b>Total (horas):</b> |               |              |                             | <b>7:45:00</b>                   |  |

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 12. Historial de fallas del mes de abril del 2017.

| Abril 2017.           |            |          |                      |                           |   |
|-----------------------|------------|----------|----------------------|---------------------------|---|
| No                    | Fecha.     | Hora.    | Hora sincronización. | Tiempo perdido (minutos). | Descripción de falla.   |
| 1.                    | 13/04/2017 | 18:12:00 | 18:22:00             | 0:10:00                   | Baja presión en tubería de conducción.                              |
| 2.                    | 15/04/2017 | 06:28:00 | 12:00:00             | 5:32:00                   | Interruptor 52L, sobre corriente.                                   |
| 3.                    | 15/04/2017 | 13:47:00 | 13:58:00             | 0:11:00                   | Interruptor 52L, sobre corriente.<br>Interruptor 52G, alto voltaje. |
| 4.                    | 15/04/2017 | 15:54:00 | 16:05:00             | 0:11:00                   | Interruptor 52G, alto voltaje.                                      |
| 5.                    | 16/04/2017 | 08:45:00 | 08:56:00             | 0:11:00                   | Interruptor 52L, sobre corriente.                                   |
| 6.                    | 25/04/2017 | 05:44:00 | 05:54:00             | 0:10:00                   | Interruptor 52L, sobre corriente.                                   |
| 7.                    | 28/04/2017 | 10:05:00 | 11:30:00             | 1:25:00                   | Falla en motor de bomba de engranajes.                              |
| <b>Total (horas):</b> |            |          |                      | <b>7:50:00</b>            |   |

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 13. Historial de fallas del mes de mayo del 2017.

| Mayo 2017.            |            |          |                      |                           |   |
|-----------------------|------------|----------|----------------------|---------------------------|---|
| No                    | Fecha.     | Hora.    | Hora sincronización. | Tiempo perdido (minutos). | Descripción de falla.   |
| 1.                    | 02/05/2017 | 15:43:00 | 15:55:00             | 0:12:00                   | Interruptor 52L, sobre corriente.<br>Interruptor 52G, bajo voltaje.                           |
| 2.                    | 03/05/2017 | 10:12:00 | 10:21:00             | 0:09:00                   | Interruptor 52L, sobre corriente.<br>Interruptor 52G, bajo voltaje<br>(sin tensión en línea). |
| 3.                    | 03/05/2017 | 18:37:00 | 19:20:00             | 0:43:00                   | Fuga de aceite en (HPU).  |
| 4.                    | 05/05/2017 | 22:57:00 | 23:08:00             | 0:11:00                   | Interruptor 52L, sobre corriente.<br>Interruptor 52G, bajo voltaje.                           |
| 5.                    | 08/05/2017 | 16:08:00 | 16:23:00             | 0:15:00                   | Interruptor 52G, frecuencia.  |
| 6.                    | 11/05/2017 | 10:26:00 | 10:38:00             | 0:12:00                   | Interruptor 52L, bajo voltaje.<br>Interruptor 52G, alto voltaje.                              |
| 7.                    | 12/05/2017 | 22:36:00 | 22:45:00             | 0:09:00                   | Interruptor 52L, bajo voltaje.<br>Interruptor 52G, alto voltaje.                              |
| 8.                    | 15/05/2017 | 13:40:00 | 14: 12:00            | 0:35:00                   | Fuga de aceite en manguera flexible del cilindro de válvula.                                  |
| 9.                    | 18/05/2017 | 08:18:00 | 10:26:00             | 2:08:00                   | Interruptor 52L, sobre corriente.<br>Interruptor 52G, arranque.                               |
| <b>Total (horas):</b> |            |          |                      | <b>4:34:00</b>            |   |

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 14. Historial de fallas del mes de junio del 2017.

| Junio 2017.           |            |          |                      |                           |   |
|-----------------------|------------|----------|----------------------|---------------------------|---|
| No                    | Fecha.     | Hora.    | Hora sincronización. | Tiempo perdido (minutos). | Descripción de falla.   |
| 1.                    | 01/06/2017 | 08:16:00 | 10:44:00             | 2:28:00                   | Interruptor 52L, sobre corriente.<br>Interruptor 52G, bajo voltaje. |
| 2.                    | 04/06/2017 | 19:21:00 | 19:35:00             | 0:14:00                   | Interruptor 52L, sobre corriente.<br>Interruptor 52G, bajo voltaje. |
| 3.                    | 06/06/2017 | 12:13:00 | 12:38:00             | 0:25:00                   | Perdida de presión de aire en el sistema.                           |
| 4.                    | 08/06/2017 | 15:28:00 | 15:44:00             | 0:16:00                   | Interruptor 52L, bajo voltaje.<br>Interruptor 52G, alto voltaje.    |
| 5.                    | 11/06/2017 | 16:14:00 | 16:28:00             | 0:14:00                   | Interruptor 52L, sobre corriente.<br>Interruptor 52G, alto voltaje. |
| 6.                    | 12/06/2017 | 16:23:00 | 16:37:00             | 0:14:00                   | Baja presión en tubería de conducción.                              |
| 7.                    | 23/06/2017 | 12:50:00 | 14:05:00             | 1:15:00                   | Interruptor 52L, bajo voltaje.<br>Interruptor 52G, alto voltaje.    |
| 8.                    | 26/06/2017 | 07:10:00 | 8:00:00              | 0:50:00                   | Perdida de presión en acumulador.                                   |
| <b>Total (horas):</b> |            |          |                      | <b>5:56:00</b>            |   |

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 15. Historial de fallas del mes de julio del 2017.

| Julio 2017.           |            |          |                      |                           |   |
|-----------------------|------------|----------|----------------------|---------------------------|---|
| No                    | Fecha.     | Hora.    | Hora sincronización. | Tiempo perdido (minutos). | Descripción de falla.   |
| 1.                    | 01/07/2017 | 19:26:00 | 19:42:00             | 0:16:00                   | Interruptor 52L, bajo voltaje.<br>Interruptor 52G, alto voltaje.    |
| 2.                    | 02/07/2017 | 10:05:00 | 10:42:00             | 0:37:00                   | Fuga de aceite en tubería rígida de distribución.                   |
| 3.                    | 03/07/2017 | 09:05:00 | 9:45:00              | 0:40:00                   | Falla en sistema hidráulico en agujas de inyectores.                |
| 4.                    | 05/07/2017 | 18:52:00 | 19:07:00             | 0:15:00                   | Interruptor 52L, bajo voltaje.                                      |
| 5.                    | 09/07/2017 | 10:23:00 | 10:39:00             | 0:16:00                   | Interruptor 52L, bajo voltaje.<br>Interruptor 52G, alta frecuencia. |
| 6.                    | 26/07/2017 | 15:00:00 | 17:03:00             | 1:03:00                   | Disparo 49, Alta temperatura en devanados.                          |
| <b>Total (horas):</b> |            |          |                      | <b>3:07:00</b>            |   |

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 16. Historial de fallas del mes de agosto del 2017.

| <b>Agosto 2017.</b>   |               |              |                             |                                  |   |
|-----------------------|---------------|--------------|-----------------------------|----------------------------------|---|
| <b>No</b>             | <b>Fecha.</b> | <b>Hora.</b> | <b>Hora sincronización.</b> | <b>Tiempo perdido (minutos).</b> | <b>Descripción de falla.</b>                                      |
| 1.                    | 06/08/2017    | 16:15:00     | 16:47:00                    | 0:32:00                          | Señal de temperatura de rodamiento inferior.                      |
| 2.                    | 13/08/2017    | 18:40:00     | 18:58:00                    | 0:18:00                          | Interruptor 52l, bajo voltaje. Interruptor 52g, sobre voltaje.    |
| 3.                    | 16/08/2017    | 16:10:00     | 17:14:00                    | 1:05:00                          | Sobrecalentamiento en motor de bomba de engranes.                 |
| 4.                    | 27/08/2017    | 13:00:00     | 16:10:00                    | 3:05:00                          | Interruptor 52L, bajo voltaje. Falla a tierra de estator o rotor. |
| 5.                    | 30/08/2017    | 15:08:00     | 15:24:00                    | 0:16:00                          | Interruptor 52l, bajo voltaje. Interruptor 52g, sobre frecuencia. |
| <b>Total (horas):</b> |               |              |                             | <b>5:16:00</b>                   |   |

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 17. Historial de fallas del mes de septiembre del 2017.

| <b>Septiembre 2017.</b> |               |              |                             |                                  |   |
|-------------------------|---------------|--------------|-----------------------------|----------------------------------|---|
| <b>No</b>               | <b>Fecha.</b> | <b>Hora.</b> | <b>Hora sincronización.</b> | <b>Tiempo perdido (minutos).</b> | <b>Descripción de falla.</b>                                      |
| 1.                      | 05/09/2017    | 17:21:00     | 18:00:00                    | 0:39:00                          | Interruptor 52L, sobre corriente. Interruptor 52G, sobre voltaje. |
| 2.                      | 12/09/2017    | 18:38:00     | 19:01:00                    | 0:23:00                          | Señal de temperatura de rodamiento inferior.                      |
| 3.                      | 16/09/2017    | 11:58:00     | 16:51:00                    | 4:53:00                          | Interruptor 52L, bajo voltaje. Interruptor 52G, sobre voltaje.    |
| 4.                      | 19/09/2017    | 22:12:00     | 23:40:00                    | 1:28:00                          | Interruptor 52L, bajo voltaje. Interruptor 52G, sobre voltaje.    |
| 5.                      | 28/09/2017    | 0:17:00      | 7:37:00                     | 7:20:00                          | Fallo en velocidad del generador.                                 |
| 6.                      | 28/09/2017    | 11:20:00     | 15:20:00                    | 4:00:00                          | Limpieza de embalse (flusheo).                                    |
| 7.                      | 30/09/2017    | 19:59:00     | 20:16:00                    | 0:17:00                          | Interruptor 52l, bajo voltaje. Interruptor 52g, sobre frecuencia. |
| <b>Total (horas):</b>   |               |              |                             | <b>19:00:00</b>                  |   |

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 18. Historial de fallas del mes de octubre del 2017.

| <b>Octubre 2017.</b>  |               |              |                             |                                  |  |
|-----------------------|---------------|--------------|-----------------------------|----------------------------------|--|
| <b>No</b>             | <b>Fecha.</b> | <b>Hora.</b> | <b>Hora sincronización.</b> | <b>Tiempo perdido (minutos).</b> | <b>Descripción de falla.</b>   |
| 1.                    | 03/10/2017    | 10:32:00     | 10:43:00                    | 0:11:00                          | Interruptor 52L, sobre corriente.<br>Interruptor 52G, sobre voltaje.   |
| 2.                    | 04/10/2017    | 19:44:00     | 19:57:00                    | 0:13:00                          | Interruptor 52L, sobre corriente.<br>Interruptor 52G, sobre voltaje.   |
| 3.                    | 04/10/2017    | 22:15:00     | 22:37:00                    | 0:22:00                          | Perdida de presión de aire en el sistema.                              |
| 4.                    | 05/10/2017    | 00:02:00     | 00:15:00                    | 0:13:00                          | Interruptor 52L, sobre corriente.<br>Interruptor 52G, alta frecuencia. |
| 5.                    | 10/10/2017    | 03:15:00     | 03:32:00                    | 0:17:00                          | Interruptor 52L, sobre corriente.<br>Interruptor 52G, sobre voltaje.   |
| 6.                    | 10/10/2017    | 15:08:00     | 15:22:00                    | 0:14:00                          | Baja presión en tubería de conducción.                                 |
| 7.                    | 11/10/2017    | 15:46:00     | 15:58:00                    | 0:12:00                          | Interruptor 52L, bajo voltaje.<br>Interruptor 52G, sobre voltaje.      |
| 8.                    | 15/10/2017    | 15:07:00     | 15:18:00                    | 0:11:00                          | Interruptor 52L, sobre corriente.<br>Interruptor 52G, alta frecuencia. |
| 9.                    | 16/10/2017    | 06:07:00     | 06:19:00                    | 0:12:00                          | Interruptor 52L, bajo voltaje.<br>Interruptor 52G, sobre voltaje.      |
| 10.                   | 19/10/2017    | 08:19:00     | 08:30:00                    | 0:11:00                          | Interruptor 52L, sobre corriente.<br>Interruptor 52G, alta frecuencia. |
| 11.                   | 20/10/2017    | 16:17:00     | 16:32:00                    | 0:15:00                          | Interruptor 52L, sobre corriente.<br>Interruptor 52G, sobre voltaje.   |
| 12.                   | 21/10/2017    | 17:01:00     | 17:36:00                    | 0:35:00                          | Interruptor 52L, alto voltaje.<br>Interruptor 52G, alta frecuencia.    |
| 13.                   | 22/10/2017    | 17:37:00     | 17:48:00                    | 0:11:00                          | Interruptor 52L, bajo voltaje.<br>Interruptor 52G, alta frecuencia.    |
| 14.                   | 22/10/2017    | 19:26:00     | 21:06:00                    | 1:40:00                          | Reparación de fuga en sistema de presión hidráulica (HPU).             |
| 15.                   | 25/10/2017    | 21:33:00     | 22:30:00                    | 0:57:00                          | Interruptor 52L, bajo voltaje.<br>Interruptor 52G, sobre voltaje.      |
| <b>Total (horas):</b> |               |              |                             | <b>5:54:00</b>                   |  |

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 19. Historial de fallas del mes de noviembre del 2017.

| <b>Noviembre 2017.</b> |               |              |                             |                                  |  |
|------------------------|---------------|--------------|-----------------------------|----------------------------------|--|
| <b>No</b>              | <b>Fecha.</b> | <b>Hora.</b> | <b>Hora sincronización.</b> | <b>Tiempo perdido (minutos).</b> | <b>Descripción de falla.</b>   |
| 1.                     | 03/11/2017    | 16:21:00     | 16:37:00                    | 0:16:00                          | Interruptor 52L, sobre corriente.<br>Interruptor 52G, sobre voltaje. |
| 2.                     | 08/11/2017    | 10:59:00     | 11:36:00                    | 0:37:00                          | Interruptor 52L, sobre corriente.<br>Interruptor 52G, sobre voltaje. |
| 3.                     | 14/11/2017    | 05:26:00     | 17:22:00                    | 11:56:00                         | Cambio de empaque en compuerta de embalse.                           |
| 4.                     | 15/11/2017    | 17:33:00     | 18:05:00                    | 0:32:00                          | Señal de temperatura de rodamiento inferior.                         |
| 5.                     | 28/11/2017    | 4:47:00      | 06:41:00                    | 1:54:00                          | Interruptor 52L, bajo voltaje.<br>Interruptor 52G, alta frecuencia.  |
| <b>Total (horas):</b>  |               |              |                             | <b>15:15:00</b>                  |  |

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 20. Historial de fallas del mes de diciembre del 2017.

| <b>Diciembre 2017.</b> |               |              |                             |                                  |                                 |
|------------------------|---------------|--------------|-----------------------------|----------------------------------|---------------------------------|
| <b>No</b>              | <b>Fecha.</b> | <b>Hora.</b> | <b>Hora sincronización.</b> | <b>Tiempo perdido (minutos).</b> | <b>Descripción de falla.</b>    |
| 1.                     | 22/12/2017    | 11:32:00     | 6:07:00                     | 18:35:00                         | Falla sincronizador automático. |
| <b>Total (horas):</b>  |               |              |                             | <b>18:35:00</b>                  |                                 |

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 21. Historial de fallas del mes de enero del 2018.

| <b>Enero 2018.</b>    |               |              |                             |                                  |   |
|-----------------------|---------------|--------------|-----------------------------|----------------------------------|---|
| <b>No</b>             | <b>Fecha.</b> | <b>Hora.</b> | <b>Hora sincronización.</b> | <b>Tiempo perdido (minutos).</b> | <b>Descripción de falla.</b>  |
| 1.                    | 08/01/2018    | 16:50:00     | 18:40:00                    | 1:50:00                          | Circuito de sincronización automática. Relé k-2004-2005.            |
| 2.                    | 14/01/2018    | 05:25:00     | 10:12:00                    | 4:47:00                          | Circuito de sincronización automática. Relé k-2004-2005.            |
| 3.                    | 20/01/2018    | 15:40:00     | 16:01:00                    | 0:21:00                          | Sensor de freno no desactiva.                                       |
| 4.                    | 24/01/2018    | 14:14:00     | 16:52:00                    | 2:38:00                          | Circuito de sincronización automática. Relé k-2004-2005.            |
| 5.                    | 28/01/2018    | 03:24:00     | 03:51:00                    | 0:27:00                          | Señal de temperatura de rodamiento inferior.                        |
| 6.                    | 30/01/2018    | 01:53:00     | 02:06:00                    | 0:13:00                          | Interruptor 52L, sobre corriente.<br>Interruptor 52G, bajo voltaje. |
| 7.                    | 30/01/2018    | 10:55:00     | 11:03:00                    | 0:08:00                          | Interruptor 52L, sobre corriente.<br>52G, bajo voltaje.             |
| <b>Total (horas):</b> |               |              |                             | <b>10:24:00</b>                  |   |

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 22. Historial de fallas del mes febrero del 2018.

| <b>Febrero. 2018.</b> |               |              |                             |                                  |  |
|-----------------------|---------------|--------------|-----------------------------|----------------------------------|--|
| <b>No</b>             | <b>Fecha.</b> | <b>Hora.</b> | <b>Hora sincronización.</b> | <b>Tiempo perdido (minutos).</b> | <b>Descripción de falla.</b>                                       |
| 1.                    | 06/02/2018    | 14:46:00     | 14:54:00                    | 0:08:00                          | 52G pico bajo voltaje.   |
| 2.                    | 20/02/2018    | 08:06:00     | 08:15:00                    | 0:09:00                          | Interruptor 52L, bajo voltaje.<br>Interruptor 52G alto voltaje.    |
| 3.                    | 20/02/2018    | 20:49:00     | 21:48:00                    | 0:59:00                          | Alta temperatura, devanados.                                       |
| 4.                    | 21/02/2017    | 08:06:00     | 08:16:00                    | 0:10:00                          | Interruptor 52L, sobre corriente.<br>Interruptor 52G bajo voltaje. |
| 5.                    | 22/02/2018    | 11:46:00     | 11:57:00                    | 0:11:00                          | 52G pico bajo voltaje.   |
| 6.                    | 23/02/2018    | 10:22:00     | 11:31:00                    | 1:09:00                          | Interruptor 52L, bajo voltaje.                                     |
| 7.                    | 23/02/2018    | 12:10:00     | 12:19:00                    | 0:09:00                          | 52G pico bajo voltaje.   |
| 8.                    | 24/02/2018    | 08:59:00     | 09:10:00                    | 0:11:00                          | Interruptor 52L, sobre corriente.<br>Interruptor 52G bajo voltaje. |
| <b>Total (horas):</b> |               |              |                             | <b>3:06:00</b>                   |  |

Fuente: Elaboración propia.

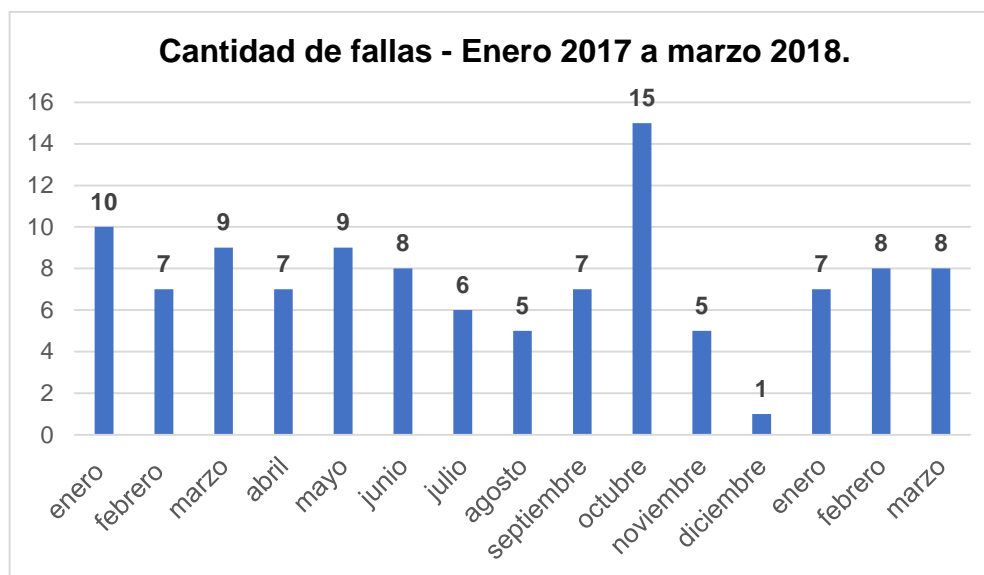
Tabla 23. Historial de fallas del mes de marzo del 2018.

| <b>Marzo. 2018.</b>   |               |              |                             |                                  |   |
|-----------------------|---------------|--------------|-----------------------------|----------------------------------|---|
| <b>No</b>             | <b>Fecha.</b> | <b>Hora.</b> | <b>Hora sincronización.</b> | <b>Tiempo perdido (minutos).</b> | <b>Descripción de falla.</b>  |
| 1.                    | 02/03/2018    | 6:00:00      | 6:40:00                     | 0:40:00                          | Falla en señal de entrada en aguja de inyectores.                     |
| 2.                    | 02/03/2018    | 20:07:00     | 20:16:00                    | 0:09:00                          | Interruptor 52L, sobre corriente.<br>52G, bajo voltaje.               |
| 3.                    | 04/03/2018    | 11:02:00     | 12:38:00                    | 1:36:00                          | Interruptor 52L, bajo voltaje.<br>Falla en circuito de sincronización |
| 4.                    | 08/03/2018    | 10:17:00     | 10:26:00                    | 0:09:00                          | Interruptor 52L, sobre corriente.<br>52G, alto voltaje.               |
| 5.                    | 10/03/2018    | 9:53:00      | 10:01:00                    | 0:08:00                          | Interruptor 52L, sobre corriente.<br>52G, alto voltaje.               |
| 6.                    | 16/03/2018    | 16:37:00     | 16:46:00                    | 0:09:00                          | Interruptor 52L, sobre corriente.<br>52G, bajo voltaje.               |
| 7.                    | 17/03/2018    | 0:38:00      | 0:49:00                     | 0:11:00                          | Reparación de fuga en sistema de presión hidráulica (HPU).            |
| 8.                    | 27/03/2018    | 4:04:00      | 4:13:00                     | 0:09:00                          | Interruptor 52L, bajo voltaje.<br>52G, sobre frecuencia.              |
| <b>Total (horas):</b> |               |              |                             | <b>3:11:00</b>                   |   |

Fuente: Elaboración propia.

El gráfico (ver Figura 17), determina la cantidad de salidas forzadas que hubo durante cada mes, en el periodo analizado. Se calculó un promedio de aproximadamente siete fallas por mes, incluyendo los problemas por causas externas e internas, el mes que presenta más es octubre, esto se debe a que en la temporada de invierno hay más salidas de línea por problemas ocasionados por tormentas electro atmosféricas, obstrucción de tuberías por la cantidad de lodo que trae el caudal del río, fugas, sobre corrientes, alto voltaje, etc.

Figura 17. Gráfica de cantidad de fallas en la central hidroeléctrica estudiada, durante el periodo de enero 2017 a marzo 2018.



Fuente: Elaboración propia.

## 2. Evaluación de fallas y frecuencia de activación:

Después de haber identificado todas las fallas relativas durante el año 2017 y el primer trimestre del 2018, se procedió a evaluar las mismas para identificar los motivos por el cual ocurren y su nivel de criticidad basado en el nivel de frecuencia de activación, es decir la cantidad de veces que se presentó la falla en el periodo estudiado. Se tomaron en cuenta las fallas eléctricas y mecánicas que de una forma u otra forzaron a salir de línea a la central de energía.

Tabla 24. Frecuencia de activación de las fallas presentadas durante el año 2017 y el primer trimestre del 2018.

| Descripción.  | Motivos de la causa.  | Causa.   | Criticidad (frecuencia de activación). |       |      |
|---|---|----------|--|-------|------|
|   |   |          | Alta                                   | Media | Baja |
| 52-L. Bajo voltaje.                                   | Perdida de tensión en línea.  | Externa. | X                                      |       |      |
| 52-L. Sobre corriente.                                | Tormenta electro atmosférica, disturbios en la red eléctrica.                         | Externa. | X                                      |       |      |
| 52-L. Frecuencia.                                     | Tormenta electro atmosférica, disturbios en la red eléctrica.                         | Externa. | X                                      |       |      |
| 52-G. Bajo voltaje.                                   | Falla de excitación en el generador.  | Interna. | X                                      |       |      |
| 52-G. Alto voltaje.                                   | Perdida de tensión en la línea.   | Externa. | X                                      |       |      |
| 52-G. Sobre corriente.                                | Variaciones en la excitación.   | Interna. |  | X     |      |
| 52-G Frecuencia o velocidad.                          | Perdida de excitación o presión en tubería de inyectores.                             | Interna. | X                                      |       |      |
| Falla a tierra estator o rotor.                       | Falla en línea de distribución, disparo de interruptor de subestación externa.        | Externa. |  | X     |      |
| Disparo 49, alta temperatura en devanados.            | Factor de potencia reactiva al límite durante máxima potencia.                        | Interna. |  | X     |      |
| Perdida de presión en acumulador de vejiga.           | Falla en bombas de engranajes y fugas de aceite en sistema oleo hidráulico.           | Interna. |  | X     |      |
| Falla en señal de entrada en aguja de inyectores.     | Obstrucción interna, falla en sensor por vida útil o falta de calibración de carrera. | Interna. |  |       | X    |
| Señales de vibración en rodamiento superior.          | Falta de lubricación de cojinete.   | Interna. |  |       | X    |
| Falla 2, Señal de temperatura en rodamiento inferior. | Falta de lubricación de cojinete.   | Interna. |  |       | X    |
| Baja de presión en tubería de conducción.             | Obstrucción o bloqueo en tubería de presión por materiales del rio.                   | Interna. |  | X     |      |
| Señal de freno no desactiva.                          | Sensor inductivo mal posicionado o vida útil del sensor.                              | Interna. |  |       | X    |

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 24, indica la frecuencia de activación de las fallas que se presentan en la central hidroeléctrica, con este estudio se analizaron los posibles modos o causas de falla de los sistemas y su severidad.

Para obtener la frecuencia de activación de cada falla se realiza la contabilización en base al historial anteriormente descrito, fueron clasificadas según su repetitividad en alta, media y baja.

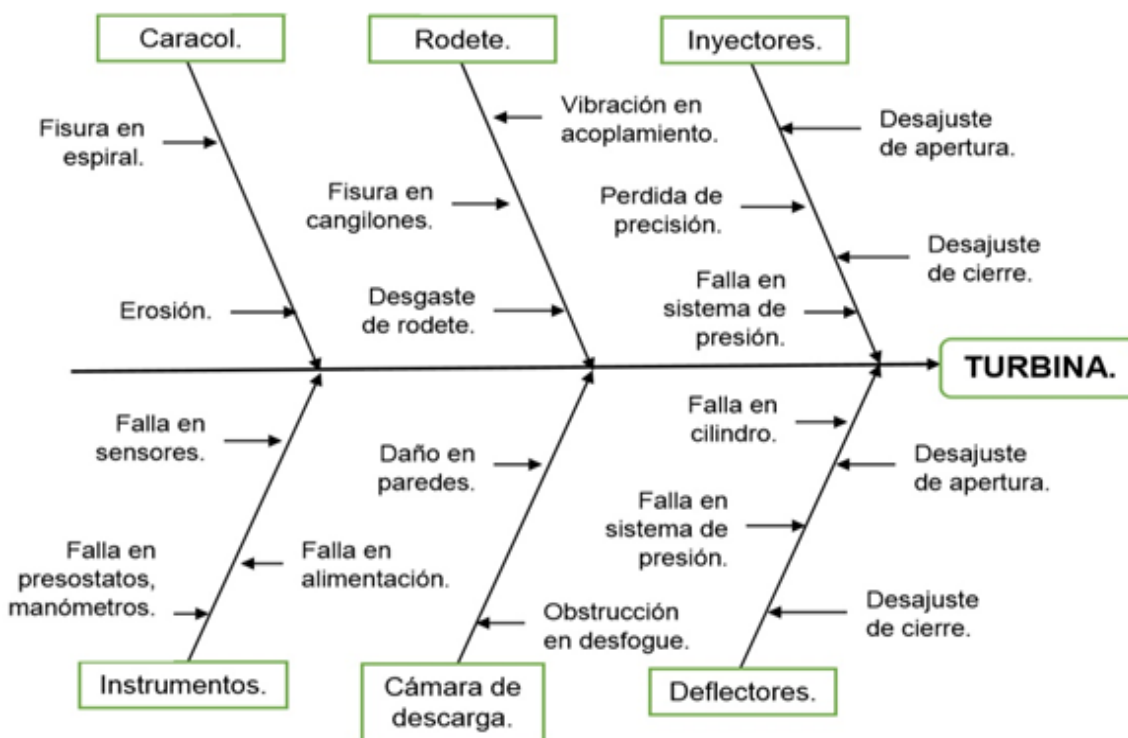
Los disparos con frecuencia alta se presentan por causas externas, es decir por tormentas electro atmosféricas o disturbios en la red eléctrica, ajenas al proceso de generación, a pesar que la mayoría de salidas de línea son por estas causas, también se identificaron fallas internas no tan repetitivas pero que si causan disparos.

Las fallas con frecuencia media y baja mayormente son causadas por motivos internos, es decir por problemas mecánicos, eléctricos o de instrumentación en los equipos.

### 3. Diagrama Ishikawa:

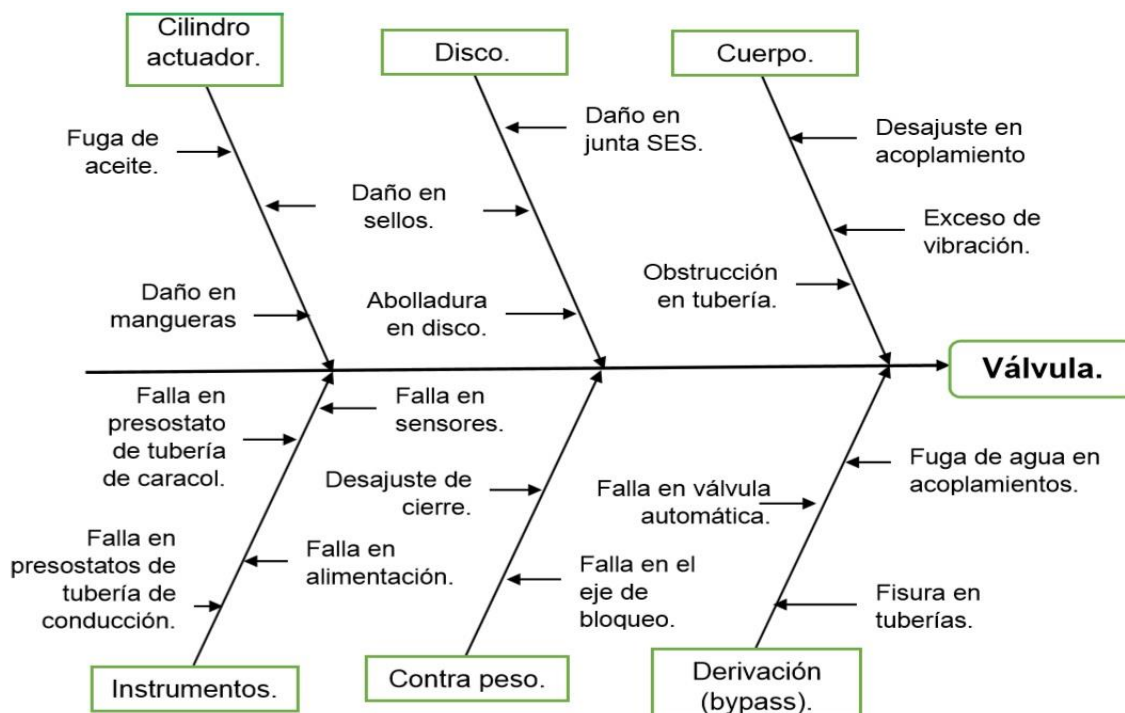
Tomando en cuenta que la mayoría de fallas provienen de causas externas debido a tormentas electro atmosféricas y disturbios en la red eléctrica, se desarrolló también un diagrama de espina de pescado por cada equipo, tomando en cuenta las fallas identificadas en el historial y las posibles fallas que pueden suceder en un futuro, provocando de esta manera disparos y salidas forzadas. A continuación, se muestran los diagramas de identificación de fallas de los equipos tomados en cuenta en este estudio.

Figura 18. Fallas identificadas en la turbina Pelton, que provocan salidas forzadas durante la generación.



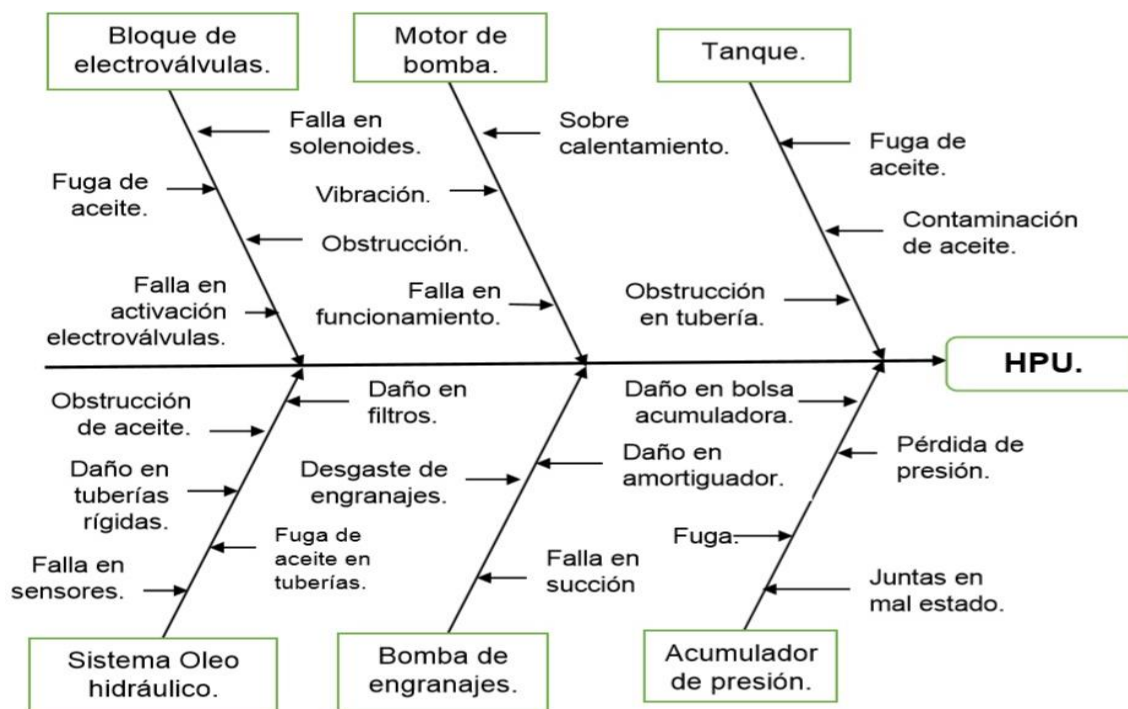
Fuente: Elaboración propia.

Figura 19. Fallas identificadas en la válvula principal de entrada, que provocan disparos y salidas forzadas durante la generación.



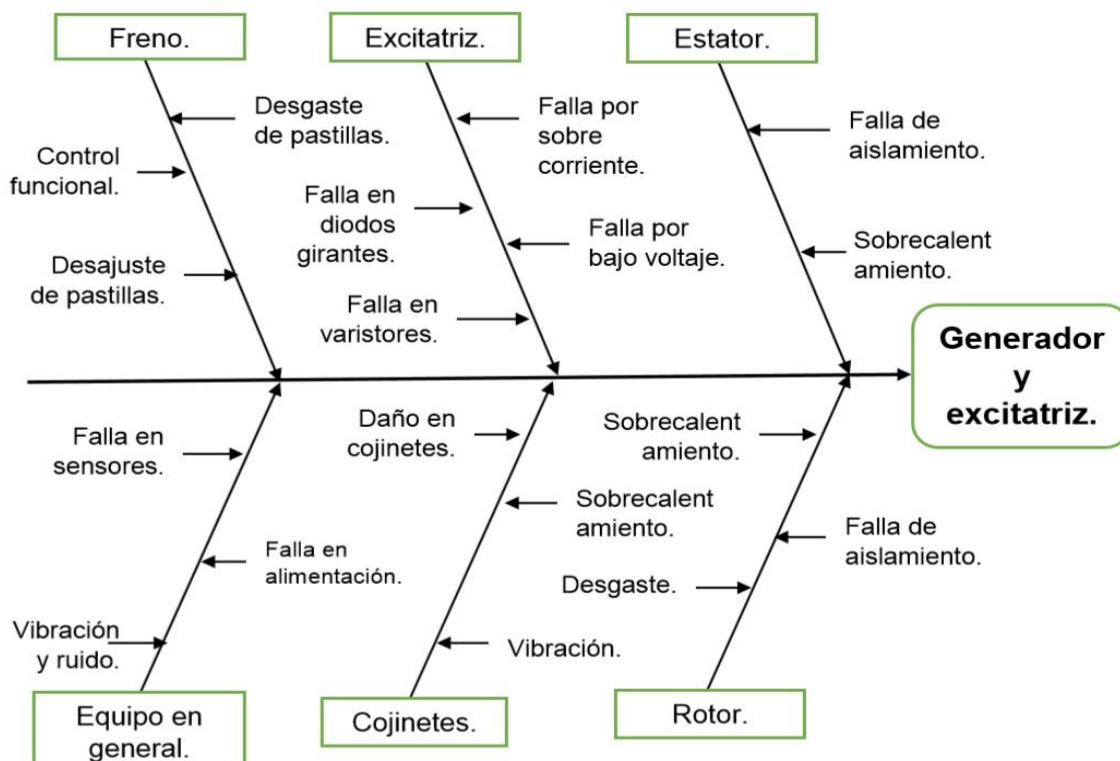
Fuente: Elaboración propia.

Figura 20. Fallas identificadas en la unidad de presión hidráulica (HPU), que provocan disparos y salidas forzadas durante la generación.



Fuente: Elaboración propia.

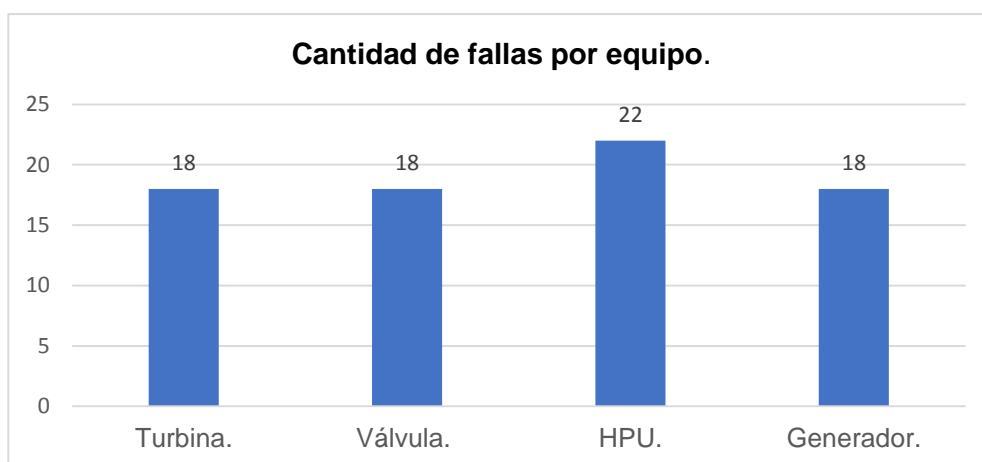
Figura 21. Fallas identificadas en la máquina sincrónica, que provocan disparos y salidas forzadas durante la generación.



Fuente: Elaboración propia.

Luego de realizar los diagramas, se procedió a contabilizar cada una de las fallas por equipo, la Figura 22, demuestra gráficamente la cantidad de fallas posibles que pueden presentarse en cada maquinaria.

Figura 22. Gráfica de cantidad de fallas identificadas, que pueden presentarse en los equipos y provocar salidas forzadas durante la generación.



Fuente: Elaboración propia.

Podemos observar en la Figura 22, que se presenta una similitud en la cantidad de fallas en cada equipo, solo la unidad de presión hidráulica presenta una cantidad mayor, debido a que esta es la que permite que los elementos de la turbina, la válvula y el sistema de freno del generador funcionen con la presión del aceite. Este equipo está propenso en su mayoría a sufrir desperfectos por fugas en las mangueras o tuberías de alimentación.

Después de identificar cada una de las fallas podemos programar las distintas actividades que conforman esta guía de mantenimiento, de este modo lograremos contrarrestar y disminuir los problemas que se presenten y que generen salidas forzadas.

## **G. PROGRAMA DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO:**

### **1. Solicitud de mantenimiento a mercado mayorista:**

Antes de llevar a cabo un mantenimiento programado, la central hidroeléctrica debe de cumplir con una base normativa impuesta por el Sistema Nacional Interconectado (SNI), esta base es utilizada para la coordinación de los trabajos programados.

Debe de presentarse una solicitud al administrador de mercado mayorista (AMM), indicando el tipo de mantenimiento que se va a realizar, ya sea mayor o menor, estos mantenimientos deben de comunicarse junto con la información correspondiente a la programación anual o semanal según corresponda.

Se refiere a mantenimiento mayor cuando este tiene una duración de 72 horas (3 días), al contrario de un mantenimiento menor con duración menor a 3 días.

El criterio a seguir para programar un mantenimiento mayor, según la norma de coordinación comercial (NCC-01), establecida por el administrador de mercado mayorista (AMM), resolución No.157-01(2001:6) dice:

La declaración del plan de mantenimiento mayor debe incluir como mínimo lo siguiente:

- a. Identificación de la unidad generadora involucrada.
- b. Potencia afectada.
- c. Causas del retiro del servicio.
- d. Duración esperada de la salida del servicio.
- e. Fecha estimada del comienzo.
- f. Fecha más temprana y más tardía de inicio del mantenimiento.

Es esencial que la central generadora proporcione esta información para la solicitud de los trabajos correspondientes, esto permite que se lleve un mejor control entre la parte solicitante y el Administrador de mercado mayorista (AMM). La importancia de determinar la potencia afectada, es para dar a conocer cuánto tiempo estará indisponible para el despacho de energía en los días en los que el mantenimiento se llevará a cabo.

## 2. Secuencia de fuera línea:

Después de coordinar el mantenimiento con el AMM, la central hidroeléctrica procede a salir de línea, siguiendo un procedimiento secuencial que consiste en lo siguiente:

- a. Coordinación para tapar boca toma del ingenio azucarero que colinda con la unidad generadora.
- b. Cierre completo de válvula principal de entrada, situada en casa de máquinas.
- c. Cierre completo de válvula tipo mariposa, situada en la presa.
- d. Apertura de inyectores de forma manual al 100%, esto para vaciar el caracol.
- e. Vaciado de tubería de conducción (si es necesario).

Este procedimiento dura aproximadamente 3 horas, desde la secuencia de salida de línea hasta el vaciado completo del caracol, sin el vaciado de la tubería de conducción.

Si fuese necesario el vaciado de la tubería de conducción se procede a realizar lo siguiente:

- a. Cierre completo de válvula tipo mariposa, situada en la presa.
- b. Apertura de la compuerta de la presa.
- c. Apertura de la válvula tipo mariposa, situada en la presa.
- d. Instalar simulador de presiones en los sensores de tubería y caracol con una presión simulada de 12.27 bar.
- e. Válvula principal de entrada completamente abierta.
- f. Apertura de inyectores en modo manual para vaciar la tubería.
- g. Apertura de válvula de desfogue de conducción.
- h. Apertura de válvula de desfogue de recámara, tubería vacía.

El tiempo aproximado del vaciado completo de la tubería de conducción es de 11 horas.

## H. IDENTIFICACIÓN DE REPUESTOS:

Es necesario que el personal cuente con un listado de todos los repuestos posibles, con sus especificaciones exactas para poder identificarlos de una forma rápida a la hora de realizar el mantenimiento y para poder hacer los pedidos correctos sin cometer errores.

Se realiza un *stock* adecuado de los repuestos y partes que necesita cada máquina para su funcionamiento, de esta manera se logrará reparar fallas imprevistas y se realizará de forma garantizada el mantenimiento.

Para su identificación se realiza un formato estándar, clasificado por sistemas, en donde se especifica la cantidad, descripción, referencia (número de serie o medidas) y la marca o proveedor de las piezas mecánicas, eléctricas y sus respectivos consumibles (filtros y lubricantes).

## 1. Repuestos del sistema de la turbina:

Tabla 25. Listado de repuestos de la turbina Pelton.

| <b>Repuestos de la turbina.</b> |   |                    |
|---------------------------------|---|--------------------|
| <b>Cantidad.</b>                | <b>Descripción.</b>                         | <b>Referencia.</b> |
| 1.                              | Tubería espiral o caracol.                  | Andritz.           |
| 1.                              | Rodete forjado una pieza.                   | Andritz.           |
| 6.                              | Inyectores.                                 | Andritz.           |
| 6.                              | Transductor de posición de inyector.        | Balluf.            |
| 6.                              | Asiento para inyectores.                    | -                  |
| 6.                              | Deflectores.                                | -                  |
| 6.                              | Transductor de posición de deflector.       | Balluf.            |
| 1.                              | Sistema de articulación de deflector.       | -                  |
| 1.                              | Cilindro del deflector de 2 posiciones.     | Cymax.             |
| 2.                              | Sensores inductivos del cilindro deflector. | Balluf.            |

Fuente: Elaboración propia.

## 2. Repuestos del generador y excitatriz:

Tabla 26. Listado de repuestos del generador y excitatriz.

| <b>Repuestos de la máquina sincrónica.</b> |  |                           |                   |
|--|--|---------------------------|-------------------|
| <b>Cantidad.</b>                           | <b>Descripción.</b>                              | <b>Referencia.</b>        | <b>Proveedor.</b> |
| 1.   | Cojinete superior.                               | 29348.                    | FAG.              |
| -  | Aceite lubricante (cojinete superior).           | ISO VG 100.               | -                 |
| 1.   | Cojinete inferior.                               | 1052.                     | FAG.              |
| -  | Grasa lubricante (cojinete inferior).            | N12MF.                    | STABURAGS.        |
| 2.   | Sensor, temperatura para cojinete.               | -                         | -                 |
| 1.   | Resistencia de calentamiento.                    | 870W – 280 W.             | -                 |
| 2.   | Puesta a tierra de carcasa y conexión principal. | 50 - 200mm <sup>2</sup> . | -                 |
| 1.   | Resistencia Pt-100, de bobinado.                 | 02/fase a 3 hilos.        | -                 |
| 1.   | Resistencia Pt-100, cojinete superior            | 6 hilos, blindado.        | -                 |
| 1.   | Resistencia Pt-100, cojinete inferior.           | 3 hilos, blindado.        | -                 |
| 1.   | Escobilla de puesta a tierra del eje.            | -                         | -                 |
| 1.   | Transductor de velocidad de rodamiento.          | ST548AE                   | METRIX.           |
| 1.   | Sistema de freno hidráulico.                     | -                         | -                 |
| -  | Pastillas de freno.                              | -                         | -                 |
| 1.   | Rueda dentada.                                   | -                         | -                 |
| 1.   | Sensor inductivo de rueda dentada.               | -                         | -                 |
| 1.   | Detector de puesta a tierra del rotor.           | -                         | -                 |
| -  | Diodos rectificadores.                           | VZPR240/160713114.        | ZYFRODE.          |
| -  | Varistores.                                      | 10394049.                 | ZYFRODE.          |

Fuente: Elaboración propia.

### 3. Repuestos de la válvula principal de entrada:

Tabla 27. Listado de repuestos de la válvula principal de entrada.

| <b>Repuestos de la válvula principal de entrada.</b> |  |                                   |
|--|--|-----------------------------------|
| <b>Elementos del contrapeso.</b>                     |  |                                   |
| <b>Cantidad.</b>                                     | <b>Descripción.</b>                    | <b>Referencia.</b>                |
| 1.   | Eje (pin) de articulación.             | D50-135-M10-X20Cr13+QT800.        |
| 1.   | Soporte del muñón del cilindro .       | 150-497-Ep40-D55-S355.            |
| 1.   | Soporte del actuador externo.          | 535-897-Ep10-S355.                |
| 1.   | Brida deslizante (placa).              | D32-D200-EP10-S235J0.             |
| 1.   | Pin de arrastre.                       | A=40-B=22-C=148-D=8-XC48+DOC.     |
| 1.   | Soporte del actuador interno.          | 535-857-Ep40-S355.                |
| 1.   | Brida de retención (tapadera).         | D177-D305-Ep25-S235ZB.            |
| 1.   | Pin de cara plana (perno).             | A=D15-B=15-C=M6-X12Cr13+QT800.    |
| 1.   | Arandela de dos piezas.                | D155-D200-Ep8.8-X12Cr13+QT650.    |
| 2.   | Arandela de presión.                   | A=D176-B=D200.5-CuSn1.            |
| 1.   | Contra placa.                          | D865-D972,48-S355.                |
| 40.  | Tornillo CHC (Allen).                  | M10x1, 5-25-A4-80.                |
| 4.   | Sello tipo "O" (O ring).               | D202.57-D7-R73-NBR 70 Shore A.    |
| 2.   | Sello tipo "O" (O ring).               | D177.2-D7-R69-NBR 70 Shore A.     |
| 2.   | Sello de labio (retenedor).            | D180-D200-13-Poliuretano 95 SH.   |
| 3.   | Sello tipo SES (retenedor).            | No.2 EPDM.                        |
| 2.   | Sello sostenedor redondo.              | D180-D215-Ep50-CuSn12.            |
| 1.   | Contrapeso.                            | 1153 Kg – FONTE.                  |
| 3.   | Sensor inductivo.                      | 1NO-XS612B1MAU20 – SHNEIDER.      |
| 1.   | Válvula de flujo (potenciómetro).      | PN350-DN12-OIL.                   |
| 2.   | Manguera hidráulica flexible.          | ½" material acero / zinc blanco.  |
| 1.   | Brazo del actuador.                    | MS 993-325-D170-S355.             |
| 1.   | Cilindro de doble efecto.              | D56-D100-605-T/C.STD.             |
| <b>Elementos del By-Pass.</b>                        |  |                                   |
| 1.   | Válvula con brida de compuerta.        | PN20 - DNQ50 – 267 - ASTM A2.     |
| 1.   | Sello de puerta espaciador.            | D150 - D219 - Ep30-S365.          |
| 6.   | Sello tipo "O".                        | R D166 - D7-R67 - NBR 70 Shore A. |
| 16.  | Varilla roscada.                       | M20x2.5 - 110 - CI8-B/ZB.         |
| 16.  | Varilla roscada.                       | M20x2.5 - 100 - CI8-B/ZB.         |
| 48.  | Tuerca tipo H.                         | M20x2,5 – 18-I B/ZB.              |
| 1.   | Válvula esférica con brida automática. | PN20-DN150-394 - AST.             |
| 1.   | Actuador hidráulico, doble efecto.     | 63DA.                             |
| 4.   | Soporte del motor de grifo.            | -                                 |
| 1.   | Centro de adaptación.                  | -                                 |
| 2.   | Llave de la unidad del motor.          | -                                 |
| 4.   | Tornillo de fijación del motor.        | -                                 |
| 4.   | Arandela de fijación del motor.        | -                                 |
| 4.   | Tuerca de montaje del motor.           | -                                 |
| 4.   | Tornillo de montaje del motor.         | -                                 |
| 4.   | Arandela que fija el motor.            | -                                 |
| 1.   | Tubería de derivación MS.              | PN20-DN150-315 P265GH.            |
| 1.   | Tubería de derivación MS.              | PN20-DN150-1170 P265GH.           |
| 1.   | Tubería de derivación MS.              | PN20-DN150-319 P265GH.            |

Fuente: Elaboración propia.

#### 4. Repuestos de la unidad de presión hidráulica (HPU):

Tabla 28. Listado de repuestos de la unidad de presión hidráulica (HPU).

| <b>Repuestos de la unidad de presión hidráulica (HPU).</b> |                                      |                                      |                  |
|--|--------------------------------------|--------------------------------------|------------------|
| <b>Cantidad</b>  | <b>Descripción</b>                   | <b>Referencia</b>                    | <b>Proveedor</b> |
| 1.   | Tanque acumulador de vejiga.         | SB330 - 050 <sup>a</sup> 4/112U330A. | Hydac.           |
| 1.   | Bloque de seguridad.                 | SAF10M330A.                          | Hydac.           |
| 1.   | Transmisor de presión electrónico.   | EDS3448-5 – 0250 – 000.              | Hydac.           |
| 1.   | Regulador de presión.                | MDF60.                               | Hydac.           |
| 1.   | Filtro del regulador de presión.     | 0060D010BN4HC.                       | Hydac.           |
| 1.   | Válvula manual de bola.              | KHB - G1/4 – 1112 - 03X.             | Hydac.           |
| 1.   | Filtro de retorno.                   | RFM165BD01BN4HC – A1.0.              | Hydac.           |
| 1.   | Filtro de aceite, tanque hidráulico. | 1262969-0165-R-010-BN4HC             | Hydac.           |
| 1.   | Indicador de nivel con termostato.   | FSA127 – 1.X/FT200/12.               | Hydac.           |
| 1.   | Filtro de ventilación del tanque.    | ELFP3F10W.                           | Hydac.           |
| 2.   | Bomba de engranajes.                 | PGP502A003 -<br>CP2D1NE3E2B1B1       | Parker.          |
| 2.   | Motor de corriente alterna.          | ETH10400503.                         | Sotic.           |
| 1.   | Bloque múltiple de electroválvulas.  | Diseño especial.                     | -                |
| 1.   | Termostato.                          | RAK582. 4/3728 M.                    | Sauter.          |
| 1.   | Interruptor de nivel (switch).       | RL – G1 F3A500 S2.                   | Mp filtri.       |
| 1.   | Manómetro de glicerina de 2”.        | 213.53 – 63 - 0/160B –<br>1/4LM.     | Wika.            |
| 1.   | Interruptor de presión (Switch).     | 0184 459 03.                         | Suco VSE.        |
| 1.   | Caja de terminales.                  | SDV6 – 212.                          | Eta.             |
| 1.   | Puerta de acceso.                    | R8 – 011.                            | Edh.             |
| 2.   | Válvula de bola.                     | 509 – ½.                             | Sferaco.         |
| 1.   | Tanque                               | Diseño FA-3432PH01.                  | F.A.             |
| 1.   | Sensor de temperatura.               | IP54.                                | Sauter.          |
| <b>Bloque múltiple de electroválvulas del HPU.</b>         |                                      |                                      |                  |
| 1.   | Válvula de control de flujo.         | DRV – 12 – 01. X/0.                  | Hydac.           |
| 1.   | Válvula de reducción de presión.     | DR08 – 01 – C – N – 050V.            | Hydac.           |
| 12.  | Válvula anti retorno (cheque).       | RVE – R1/8 – X-05.                   | Hydac.           |
| 1.   | Válvula de carrete de 4 vías.        | WKM08140X – 01M – G125.              | Hydac.           |
| 1.   | Válvula de asiento de 2 vías.        | WSM06020W – 01M – G125.              | Hydac.           |
| 1.   | Válvula de retención (cheque).       | RVM06020 – 01 – C – 05.              | Hydac.           |
| 1.   | Válvula de alivio de presión.        | DB4E01X. 200V.                       | Hydac.           |
| 2.   | Solenoides de entrada y salida.      | 25 VDC, 800 ohm.                     | Hydac.           |
| 14.  | Válvula de asiento de 3 vías.        | SDSPM18 – FG –<br>G125/MD35.         | Wandfluh.        |
| 13.  | Válvula de control de flujo.         | DNSPM18 – 0.32.                      | Wandfluh.        |
| 12.  | Servo válvulas de inyectores.        | VDE 0580 139112060.001.              | Wandfluh.        |
| 2.   | Válvula de retención (cheque).       | RHV12L REDOM DCF.                    | Parker.          |
| 6.   | Válvula servo-solenoide,             | 4WRPEH 6 C3 B02L – 2X.               | Rexroth.         |

Fuente: Elaboración propia.

## **I. IDENTIFICACIÓN DE HERRAMIENTAS:**

Es importante tener a la mano todas las herramientas indispensables para ejecutar las reparaciones necesarias, para el correcto desempeño de los trabajos de mantenimiento en los sistemas de la turbina y generador, se realiza un listado de herramientas clasificados según su fuente de energía, es decir manuales y eléctricas, que debe de tener el grupo de trabajo.

Es importante que estas cumplan con las necesidades de la planta de generación, para ello se realiza este listado, verificando el inventario de herramientas de la planta generadora, los manuales de mantenimiento y conocimientos de los operadores de la planta, de estos se tomaron en cuenta específicamente las herramientas útiles de los sistemas de la turbina y el generador, también los equipos auxiliares.

A continuación, se identifican las herramientas mediante unas tablas que especifican, la descripción y referencia (medidas), de cada una de ellas.

## 1. Herramientas manuales:

Tabla 29. Listado de herramientas manuales.

| <b>Herramientas manuales.</b>              |   |
|--|---|
| <b>Llaves.</b>                             |   |
| <b>Descripción.</b>                        | <b>Referencia.</b>  |
| Combinadas (cola corona).                  | Milimétrica.<br>Aberturas, 10, 11, 12, 13, 14, 17, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 26, 30, 32 y 55.                     |
| Combinadas (cola corona).                  | Pulgada.<br>Aberturas, 3/8, 3/8, 7/16, 1/2, 9/16, 5/8, 11/16, 3/4, 13/16, 7/8, 15/16, 1, 1-1/16, 1-1/8 & 1-1/4. |
| De golpe tipo corona.                      | Milimétrica. Aberturas, 36, 41, 46, 50, 60.   |
| De golpe tipo corona.                      | Pulgadas.<br>Aberturas, 1 1/2 y 1 7/8.  |
| Cangrejo ajustable con mango aislante.     | Pulgada. 12", 18", 24".   |
| Allen hexagonal.                           | Milimétrica.<br>1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 4.0, 5.0, 5.5, 6.0, 8.0, 10.0, 19.0.  |
| Allen hexagonal.                           | Pulgada.<br>1/16, 5/64, 3/32, 1/8, 5/32, 3/16, 7/32, 1/4, 5/16, 3/8.  |
| Copas abertura tipo estrella.              | Raíz 1/2", milimétrica.<br>10, 11, 12, 13, 14, 15, 17, 19, 32.  |
| Copas abertura tipo estrella.              | Raíz 1/2", pulgadas. 3/8, 7/16, 1/2, 9/16, 5/8, 11/16, 3/4.   |
| Copas hexagonales de impacto.              | Raíz 1/2", milimétrica. 17, 19, 22, 24, 32.   |
| Copas hexagonales.                         | Raíz 1/4", milimétrica.<br>7, 8, 9, 10, 13.   |
| Copas hexagonales.                         | Raíz 1/4", pulgada.<br>5/32, 3/16, 7/32, 1/4, 9/32, 5/16, 11/32, 3/8, 7/16, 1/2.                                |
| Copas hexagonales.                         | Raíz 3/4", milimétrica.<br>30, 32, 35.  |
| Copas hexagonales.                         | Raíz 3/4", pulgada.<br>15/16", 1 1/2".  |
| Dado con punta hexagonal.                  | Raíz 1/2, milimétrica.<br>8, 10, 12, 14, 18, 19.  |
| Trinquete (ratchet), largo de 10".         | Raíz 1/2.   |
| Trinquete (ratchet), largo de 5".          | Raíz 1/4.   |
| Trinquete (ratchet), largo de 10".         | Raíz 3/4.   |
| Palanca articular (maneral).               | Raíz 1/2.   |
| Palanca articular (maneral), largo de 20". | Raíz 3/4.   |
| Palanca articular (maneral), largo de 15". | Raíz 1/2.   |
| Destornilladores de punta plana.           | 3/16x6", 1/4x6", 1/4x4", 3/16x3", 1/8x2".   |
| Destornilladores de punta de cruz.         | 3x1 1/2", 0x2", 1x4", 2x4".   |
| Destornilladores de golpe, punta plana.    | 5x75mm, 6x10mm, 8x150mm.  |
| Destornilladores de golpe, punta de cruz.  | 1x75mm, 2x100mm, 3x150mm.   |
| Destornilladores de precisión planos.      | 1.5mm, 2.0mm, 2.4mm, 3mm.   |

| <b>Martillos.</b>                           |  |
|---|--|
| <b>Descripción</b>                          | <b>Referencia.</b>                                     |
| De bola con mango de madera.                | 3 libras.  |
| De hule con mango de madera.                | 1.5 libras.  |
| Almádana con mango de largo 30".            | 8 libras.  |
| <b>Alicates y Tenazas.</b>                  |  |
| Alicate con mango antideslizante.           | 9 pulgadas de largo.                                   |
| Alicate de presión recta (vise grip).       | 10 pulgadas de largo.                                  |
| Alicate múltiple para anillos de retención. | Interior y exterior.                                   |
| Alicate de corte diagonal.                  | Tenaza corte diagonal 8".                              |
| Alicate de punta larga.                     | 8 pulgadas.  |
| <b>Extractores.</b>                         |  |
| De rodamiento de 2 brazos.                  | Distancia nominal de agarre 170mm (6.7").              |
| De rodamiento de 3 brazos.                  | Distancia nominal de agarre 300mm (11.8").             |
| <b>Medición.</b>                            |  |
| Torquímetro profesional.                    | Encastre de ½", rango: 30 -150 escala ft-lb.           |
| Torquímetro profesional.                    | Encastre de ¾", rango: 110 - 590 escala ft-lb.         |
| Calibrador de hojas.                        | Unidad en milésimas, espesor de 26 hojas.              |
| Calibrador pie de rey.                      | Unidad en metros, 6 pies de largo.                     |
| Calibrador de cangilones o cucharas.        | -  |
| <b>Elevación.</b>                           |  |
| Eslinga.                                    | Longitud de 1.3 y 5 metros.<br>10,000 kg de capacidad. |
| Polipasto.                                  | Capacidad máxima 5 toneladas.                          |
| Escalera de extensión.                      | Aluminio de 16 pies.                                   |
| Escalera de 2 bandas.                       | Aluminio de 12 pies.                                   |
| Andamio.                                    | -  |

Fuente: Elaboración propia.

## 2. Herramientas eléctricas:

Tabla 30. Listado de herramientas eléctricas.

| <b>Herramientas eléctricas.</b> |   |
|---------------------------------|---|
| <b>Descripción.</b>             | <b>Referencia.</b>  |
| Detector de voltaje.            | Rango de 115 – 220 V. 4.2 a 69 kV.  |
| Pértiga telescópica.            | Hastings de fibra de vidrio, largo 10 m.  |
| Multímetro portátil.            | Calibrador de lazo de corriente.  |
| Medidor de temperatura.         | Termómetro infrarrojo tipo laser digital.   |
| Cables de puesta a tierra.      | 1/0 AWG, con mordazas.  |
| Amperímetro de gancho.          | Pinza de corriente flexible, mediciones de corriente, tensión, frecuencia, resistencia, capacitancia. |
| Medidor de aislación.           | Megger, tensión de ensayo de 2500 V.  |

Fuente: Elaboración propia.

## **J. PLAN SEGURO DE TRABAJO (PST):**

El mantenimiento de los equipos incluye acciones técnicas realizadas por los trabajadores de las empresas, muchas veces estas actividades exponen a los mismos a riesgos que les pueden causar daños físicos por caídas, golpes o malas posturas, también enfermedades por la exposición a solventes y polvos.

El proceso de mantenimiento se inicia antes que el trabajador comience a realizar una tarea específica y finaliza cuando ha revisado y puesto a prueba el trabajo realizado.

Para garantizar la seguridad de los encargados del mantenimiento, se ha propuesto un plan de actividad segura de trabajo, identificando los riesgos potenciales, elementos de protección y medidas de seguridad.

A continuación, se presenta una guía sobre la actividad segura de trabajo, especificando lo que se debe de hacer antes, durante y después del mantenimiento de cada máquina.

La realización de este análisis está dividido por equipos, tomando en cuenta la turbina, el generador y los equipos auxiliares que son la válvula principal de entrada y la unidad de presión hidráulica.

## 1. Plan seguro de trabajo del sistema de la turbina y componentes auxiliares:

### a. Plan seguro de trabajo de la turbina tipo Pelton.

Tabla 31. Plan seguro de trabajo de la turbina Pelton.

| Riesgos potenciales.   | Elementos de protección.   | Desarrollo del trabajo seguro.   |
|--|--|--|
| <b>Etapa: Antes del mantenimiento.</b>   |  |  |
| 1. Caídas del mismo nivel.<br>2. Golpes.   | 1. Casco protector.<br>2. Calzado industrial.<br>3. Ropa de trabajo.   | 1. Verificar el estado de los elementos de protección.<br>2. Coordinar con el superior el trabajo a realizar<br>3. Confirmar que esté fuera de línea la unidad generadora.<br>4. Activar cadena de cierre rápido (paro de emergencia).<br>5. Coordinar con el operador la parada de la maquinaria.<br>6. Verificar el cierre de la válvula principal.<br>7. Confirmar apertura de la válvula de desfogue de la recámara.<br>8. Verificar que esté completamente vacío el caracol.<br>9. Armar y asegurar andamio.<br>10. Preparar la herramienta necesaria que se va a utilizar. |
| <b>Etapa: Durante el mantenimiento.</b>  |  |  |
| 1. Caídas del mismo nivel.<br>2. Caídas de distinto nivel.<br>3. Contacto con grasas y aceites.<br>4. Deslizamiento. | 1. Casco protector.<br>2. Ropa de trabajo.<br>3. Calzado industrial.<br>4. Gafas de seguridad.<br>5. Protector auditivo.<br>6. Guantes de cuero. | 1. Señalamiento y aseguramiento de zona de trabajo.<br>2. Iluminación de la recámara.<br>3. Realización de tareas, según el cronograma de actividades.<br>4. Recoger herramientas utilizadas en el área.<br>5. Ordenar y limpiar el área de trabajo.<br>6. Retirar señalizaciones.   |
| <b>Etapa: Después del mantenimiento.</b>   |  |  |
| 1. Caídas del mismo nivel.<br>2. Golpes.<br>3. Deslizamiento.  | 1. Casco protector.<br>2. Calzado industrial.<br>3. Ropa de trabajo.   | 1. Informe sobre alguna anomalía que se haya encontrado durante el mantenimiento.<br>2. Desactivar cadena de cierre rápido (paro de emergencia).<br>3. Cerrar válvula de desfogue de la recámara.<br>4. Confirmar que no queden objetos dentro de la recámara.<br>5. Informe final al superior.<br>6. Puesta a prueba del trabajo realizado.   |

Fuente: Elaboración propia.

**b. Plan seguro de trabajo de la válvula principal de entrada:**

Tabla 32. Plan seguro de trabajo de la válvula principal de entrada.

| <b>Riesgos potenciales.</b>  | <b>Elementos de protección.</b>  | <b>Desarrollo del trabajo seguro.</b>  |
|--|--|--|
| <b>Etapas: Antes del mantenimiento.</b>  |  |  |
| 1. Caídas del mismo nivel.<br>2. Golpes.   | 1. Casco protector.<br>2. Calzado industrial.<br>3. Ropa de trabajo.   | 1. Verificar el estado de los elementos de protección.<br>2. Coordinar con el superior el trabajo a realizar<br>3. Activar cadena de cierre rápido (paro de emergencia).<br>4. Confirmar que esté vacía la presa, la tubería de conducción y el caracol.<br>5. Verificar que no se induzcan esfuerzos o tensiones en la válvula.<br>6. Preparar herramienta necesaria. |
| <b>Etapas: Durante el mantenimiento.</b>   |  |  |
| 1. Caídas del mismo nivel.<br>2. Golpes.<br>3. Deslizamiento.<br>4. Cortes.<br>5. Contacto con grasas y aceites. | 1. Casco protector.<br>2. Ropa de trabajo.<br>3. Calzado industrial.<br>4. Gafas de seguridad.<br>5. Protector auditivo.<br>6. Guantes de cuero. | 1. Señalamiento y aseguramiento de zona de trabajo.<br>2. Realización de las tareas, según el cronograma de actividades.<br>3. Recoger las herramientas empleadas en el trabajo.<br>4. Ordenar y limpiar el área de trabajo.<br>5. Retirar Señalizaciones.   |
| <b>Etapas: Después del mantenimiento.</b>  |  |  |
| 1. Caídas del mismo nivel.<br>2. Golpes.<br>3. Deslizamiento.  | 1. Casco protector.<br>2. Calzado industrial.<br>3. Ropa de trabajo.   | 1. Controlar que la válvula principal de entrada, esté lista para operar.<br>2. Controlar que los acoplamientos del sistema oleo hidráulico de la válvula, estén debidamente apretados.<br>3. Controlar que todas las válvulas de drenaje estén cerradas.<br>4. Desactivar cadena de cierre rápido (paro de emergencia).<br>5. Informe final al superior.              |

Fuente: Elaboración propia.

**c. Plan seguro de trabajo de la unidad de presión hidráulica (HPU).**

Tabla 33. Plan seguro de trabajo de la unidad de presión hidráulica.

| <b>Riesgos potenciales.</b>   | <b>Elementos de protección.</b>   | <b>Desarrollo del trabajo seguro.</b>  |
|---|---|--|
| <b>Etapa: Antes del mantenimiento.</b>  |   |  |
| <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Caídas del mismo nivel.</li> <li>2. Golpes.</li> </ol>  | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Casco protector.</li> <li>2. Calzado industrial.</li> <li>3. Ropa de trabajo.</li> </ol>  | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Verificar el estado de los elementos de protección.</li> <li>2. Activar cadena de cierre rápido (paro de emergencia).</li> <li>3. Verificar que el mando de control del HPU esté en modo de paro.</li> <li>4. Coordinar con el superior el trabajo a realizar.</li> <li>5. Coordinar con el operador la parada de la maquinaria.</li> <li>6. Preparar herramienta necesaria.</li> </ol>  |
| <b>Etapa: Durante el mantenimiento.</b>   |   |  |
| <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Caídas del mismo nivel.</li> <li>2. Golpes.</li> <li>3. Deslizamiento.</li> <li>4. Cortes.</li> <li>5. Contacto con grasa y aceites.</li> </ol> | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Casco protector.</li> <li>2. Ropa de trabajo.</li> <li>3. Calzado industrial.</li> <li>4. Gafas de seguridad</li> <li>5. Protector auditivo.</li> <li>6. Guantes de cuero.</li> </ol> | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Señalamiento y aseguramiento de zona de trabajo.</li> <li>2. Realización de las tareas, según el cronograma de actividades.</li> <li>3. Recoger las herramientas empleadas en el trabajo.</li> <li>4. Ordenar y limpiar el área de trabajo.</li> <li>5. Retirar Señalizaciones.</li> </ol>   |
| <b>Etapa: Después del mantenimiento.</b>  |   |  |
| <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Caídas del mismo nivel.</li> <li>2. Golpes.</li> <li>3. Deslizamiento.</li> </ol>   | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Casco protector.</li> <li>2. Calzado industrial.</li> <li>3. Ropa de trabajo.</li> </ol>  | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Informe sobre alguna anomalía que se haya encontrado durante el mantenimiento.</li> <li>2. Controlar que la unidad de presión hidráulica (HPU), esté lista para operar.</li> <li>3. Colocar el mando de control del HPU a modo automático.</li> <li>4. Verificar que se encuentren cerradas las salidas de drenaje en el tanque de aceite y el acumulador.</li> <li>5. Desactivar la cadena de cierre rápido (paro de emergencia).</li> <li>6. Informe final al superior.</li> </ol> |

Fuente: Elaboración propia.

## 2. Plan seguro de trabajo de la máquina sincrónica.

### a. Plan seguro de trabajo del generador y excitatriz.

Tabla 34. Plan seguro de trabajo del generador y excitatriz.

| Riesgos potenciales.  | Elementos de protección.  | Desarrollo del trabajo seguro.  |
|---|---|---|
| <b>Etapa: Antes del mantenimiento.</b>  |   |   |
| 1. Caídas del mismo nivel.<br>2. Golpes.  | 1. Casco protector.<br>2. Calzado industrial.<br>3. Ropa de trabajo.  | 1. Verificar el estado de los elementos de protección.<br>2. Coordinar con el superior el trabajo a realizar.<br>3. Activar la cadena de cierre rápido (paro de emergencia).<br>4. Verificar que el interruptor del generador este abierto.<br>5. Confirmar que la unidad generadora este fuera de línea.<br>6. Coordinar con el operador la parada de la maquinaria.<br>7. Preparar herramienta necesaria. |
| <b>Etapa: Durante el mantenimiento.</b>   |   |   |
| 1. Caídas del mismo nivel.<br>2. Caídas de distinto nivel.<br>3. Golpes.<br>4. Deslizamiento.<br>5. Cortes.<br>6. Contacto con grasa y aceites. | 1. Casco protector.<br>2. Ropa de trabajo.<br>3. Calzado industrial.<br>4. Gafas de seguridad<br>5. Protector auditivo.<br>6. Guantes de cuero. | 1. Señalamiento y aseguramiento de zona de trabajo.<br>2. Realización de las tareas, según el cronograma de actividades.<br>3. Recoger las herramientas empleadas en el trabajo.<br>4. Ordenar y limpiar el área de trabajo.<br>5. Retirar Señalizaciones.  |
| <b>Etapa: Después del mantenimiento.</b>  |   |   |
| 1. Caídas del mismo nivel.<br>2. Golpes.<br>3. Deslizamiento.   | 1. Casco protector.<br>2. Calzado industrial.<br>3. Ropa de trabajo.  | 1. Informe sobre alguna anomalía que se haya encontrado durante el mantenimiento.<br>2. Verificar que estén instaladas las rejillas y tapaderas del generador.<br>3. Verificar que no exista ningún bloqueo eléctrico y mecánico.<br>4. Desactivar el bloqueo del interruptor del generador.<br>5. Desactivar cadena de cierre rápido (paro de emergencia).<br>6. Informe final al superior.                |

Fuente: Elaboración propia.

## **K. CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES DE MANTENIMIENTO, DE LA TURBINA PELTON, VÁLVULA PRINCIPAL DE ENTRADA, UNIDAD DE PRESIÓN HIDRÁULICA Y MÁQUINA SINCRÓNICA:**

Habiendo identificado las fallas y recopilado información general de los equipos a los que se realiza la investigación, los repuestos y herramientas correspondientes a cada uno, se procedió a la creación de un cronograma de actividades realizado por sistemas y componentes auxiliares.

A continuación, se presenta el cronograma de actividades dividido e identificado por nombre, ya sea del sistema, subsistema o componente auxiliar, según corresponda.

El cronograma indica en la primera columna el número de actividad, la segunda da la descripción de lo que se va a realizar en el mantenimiento y la tercera indica la frecuencia de realización.

La calendarización preventiva para la realización de las actividades de los equipos está basada en los 3 mantenimientos propuestos anteriormente en la gestión, tomando en cuenta también actividades que se pueden realizar durante la operación de la maquinaria.

## 1. Actividades preventivas del sistema de la turbina y componentes auxiliares.

### a. Actividades de la turbina:

Tabla 35. Cronograma de actividades de la turbina Pelton.

| Descripción.   | En operación. |         | Temporada de Invierno. |        |         |
|--|---------------|---------|------------------------|--------|---------|
|  | Semanal       | Mensual | Mayo                   | Agosto | Octubre |
| <b>Caracol.</b>  |               |         |                        |        |         |
| Inspección visual de carcasa.  |               |         | X                      | X      | X       |
| <b>Rodete.</b>   |               |         |                        |        |         |
| Inspección visual, control de desgaste y fisuras.                              |               |         | X                      | X      | X       |
| Control de la limpieza.  |               |         | X                      | X      | X       |
| Prueba de líquidos penetrantes.  |               |         | X                      |        | X       |
| Verificación de ajuste de tornillos.   |               |         |                        | X      | X       |
| <b>Inyectores.</b>   |               |         |                        |        |         |
| Inspección visual y control de desgaste a punta de agujas.                     |               |         | X                      |        | X       |
| Inspección y control de desgaste a los asientos y dispositivos del deflector.  |               |         | X                      |        | X       |
| Inspección de desgastes de inyectores.   |               |         | X                      |        | X       |
| Verificación de apertura normal de cada aguja.                                 | X             |         |                        |        |         |
| Verificación del funcionamiento de los sensores de posición de los inyectores. | X             |         |                        |        |         |
| Verificación de los sensores de posición de los deflectores.                   | X             |         |                        |        |         |
| Verificación de ajuste de pernos de acoplamiento de los deflectores.           |               |         |                        | X      | X       |
| Calibración de carrera de agujas.  |               |         |                        |        | X       |
| Calibración de carrera de deflectores.   |               |         |                        |        | X       |
| <b>Cámara de descarga.</b>   |               |         |                        |        |         |
| Inspección visual en estructura.   |               |         |                        | X      | X       |
| Control de limpieza.   |               |         |                        | X      | X       |
| <b>Equipo en general.</b>  |               |         |                        |        |         |
| Verificación, ajuste de tornillos y seguros.                                   |               |         |                        | X      | X       |
| Ajuste de acoplamientos.   |               |         |                        | X      | X       |
| Verificación de fugas en circuitos hidráulicos.                                |               |         |                        | X      | X       |
| Inspección y control de corrosión.   |               |         | X                      |        | X       |
| Verificación de los dispositivos de seguridad, presostatos y manómetros.       | X             |         |                        |        |         |
| Lubricación del vástago de guía del cilindro deflector.                        |               |         |                        |        | X       |
| Verificación de sensores de posición del cilindro deflector.                   | X             |         |                        |        |         |

Fuente: Elaboración propia.

**b. Actividades de la válvula principal de entrada:**

Tabla 36. Cronograma de actividades de la válvula principal de entrada.

| Descripción.   | En operación. |         | Temporada de Invierno. |        |         |
|--|---------------|---------|------------------------|--------|---------|
|  | Semanal       | Mensual | Mayo                   | Agosto | Octubre |
| <b>Cuerpo.</b>   |               |         |                        |        |         |
| Inspección visual de carcasa.  |               | X       |                        |        |         |
| Control de limpieza.   |               |         | X                      | X      | X       |
| Verificación de acoplamiento y ajuste de pernos hacia tubería de presión.            |               |         |                        | X      | X       |
| Verificación de acoplamiento y ajuste de pernos hacia tubería de caracol.            |               |         |                        | X      | X       |
| <b>Disco.</b>  |               |         |                        |        |         |
| Inspección visual.   |               |         |                        |        | X       |
| Verificación de desgaste de junta SES.   |               |         |                        |        | X       |
| <b>Cilindro actuador.</b>  |               |         |                        |        |         |
| Inspección visual.   |               | X       |                        |        | X       |
| Control de limpieza.   |               |         | X                      | X      | X       |
| Lubricación a zonas expuestas a desgaste.  |               |         |                        |        | X       |
| Inspección de manguera flexible y acoples  |               | X       |                        |        |         |
| Lubricación de la bola del cilindro.   |               |         |                        |        | X       |
| <b>Contrapeso.</b>   |               |         |                        |        |         |
| Inspección visual.   |               | X       |                        |        |         |
| Control de limpieza.   |               |         | X                      | X      | X       |
| Verificación de estado del eje de bloqueo.   |               |         |                        | X      | X       |
| Verificación y/o ajuste del indicador de disco graduado.                             |               |         |                        | X      | X       |
| Verificación y/o ajuste de acoplamiento.   |               |         |                        | X      | X       |
| Verificación de funcionalidad de sensores.   | X             |         |                        | X      | X       |
| Verificación y/o Calibración de distancia del sensor de apertura, cierre y tránsito. |               |         |                        |        | X       |
| <b>Derivación (bypass).</b>  |               |         |                        |        |         |
| Inspección visual.   |               | X       |                        |        |         |
| Control de limpieza.   |               |         | X                      | X      | X       |
| Verificación de soldaduras.  |               | X       |                        |        |         |
| Verificación y/o ajuste de acoplamiento.   |               |         |                        | X      | X       |
| Verificación del funcionamiento de la válvula manual de compuerta.                   |               | X       |                        |        | X       |
| Verificación del funcionamiento de la válvula automática.                            | X             |         |                        |        | X       |
| <b>Equipo en general.</b>  |               |         |                        |        |         |
| Ajuste de acoplamientos del sistema oleo hidráulico.                                 |               |         |                        | X      | X       |
| Ajuste de pernos de los accesorios.  |               |         |                        | X      | X       |
| Verificación de funcionamiento de presostatos de tubería de presión y caracol.       | X             |         |                        |        |         |

Fuente: Elaboración propia.

**c. Actividades de la unidad de presión hidráulica:**

Tabla 37. Cronograma de actividades de la unidad de presión hidráulica.

| Descripción.  | En operación.   |         | Temporada de Invierno. |        |         |
|---|---|---------|------------------------|--------|---------|
|   | Semanal   | Mensual | Mayo                   | Agosto | Octubre |
| <b>Tanque y acumulador de presión.</b>                                  |   |         |                        |        |         |
| Inspección visual.  |   | X       |                        |        |         |
| Control de limpieza.  |   |         | X                      | X      | X       |
| Limpieza y/o cambio de filtros.   | Conforme al periodo indicado en el dispositivo.           |         |                        |        |         |
| Verificación, nivelación y/o cambio, de aceite en el depósito.          | Según los resultados del análisis de aceite.              |         |                        |        |         |
| Control de presión y temperatura del aceite en el sistema.              | X   |         |                        |        |         |
| <b>Bomba de engranajes.</b>   |   |         |                        |        |         |
| Inspección visual.  |   |         | X                      | X      | X       |
| Control de limpieza.  |   |         | X                      | X      | X       |
| Limpieza y/o cambio de filtro de aspiración del tanque de aceite.       | Conforme al periodo indicado en el dispositivo.           |         |                        |        |         |
| <b>Motor asíncrono de bomba.</b>  |   |         |                        |        |         |
| Inspección visual.  |   | X       |                        |        |         |
| Inspección de ruido y vibraciones.                                      | X   |         |                        |        |         |
| Control de limpieza.  |   |         | X                      |        | X       |
| Medición de resistencia de aislamiento del devanado.                    |   |         |                        |        | X       |
| Inspección y/o cambio de rodamientos.                                   | Conforme a las características técnicas del equipamiento. |         |                        |        |         |
| Limpieza y apriete de bornes en caja de conexiones.                     |   |         | X                      |        | X       |
| <b>Bloque múltiple de electroválvulas.</b>                              |   |         |                        |        |         |
| Inspección visual.  |   | X       |                        |        |         |
| Control de limpieza.  |   |         | X                      | X      | X       |
| Verificación del estado de las tuberías rígidas de distribución.        |   | X       |                        |        |         |
| Verificación y/o ajuste de conectores hidráulicos y juntas de tuberías. |   |         |                        | X      | X       |
| Reapretar los tornillos.  |   |         |                        | X      |         |
| <b>Equipo en general.</b>   |   |         |                        |        |         |
| Inspección visual.  |   | X       |                        |        |         |
| Control de limpieza.  |   |         | X                      | X      | X       |
| Verificación y/o ajuste de pernos de anclaje.                           |   |         |                        | X      | X       |
| Verificación y/o ajuste de tornillos, elementos de fijación y soporte.  |   |         |                        | X      | X       |
| Acondicionamiento de cableado de alimentación a electroválvulas.        |   |         | X                      |        | X       |

Fuente: Elaboración propia.

## 2. Actividades preventivas de la máquina sincrónica:

### a. Actividades de la máquina sincrónica:

Tabla 38. Cronograma de actividades del generador y excitatriz.

| Descripción.  | En operación   |         | Temporada de Invierno. |        |         |
|---|--|---------|------------------------|--------|---------|
|   | Semanal  | Mensual | Mayo                   | Agosto | Octubre |
| <b>Estator.</b>   |  |         |                        |        |         |
| Inspección visual del estator.                            |  |         |                        |        | X       |
| Control de la limpieza.                                   |  |         |                        |        | X       |
| Medir la resistencia de aislamiento.                      |  |         |                        |        | X       |
| <b>Rotor.</b>   |  |         |                        |        |         |
| Control de la limpieza.                                   |  |         |                        |        | X       |
| Inspección visual.  |  |         |                        |        | X       |
| Inspección del eje (desgaste).                            |  |         |                        |        | X       |
| <b>Excitatriz.</b>  |  |         |                        |        |         |
| Control de la limpieza.                                   |  |         | X                      | X      | X       |
| Testar diodos y varistores.                               |  |         |                        |        | X       |
| Inspeccionar las bobinas.                                 |  |         |                        |        | X       |
| <b>Cojinetes.</b>   |  |         |                        |        |         |
| Control del ruido, vibración.                             | X  |         |                        |        |         |
| Verificación de temperatura.                              | X  |         |                        |        |         |
| Análisis de lubricante (aceite).                          |  |         | X                      |        | X       |
| Cambiar el lubricante.                                    | Conforme a las características indicadas del cojinete.         |         |                        |        |         |
| <b>Cajas de conexión y terminales de puesta a tierra.</b> |  |         |                        |        |         |
| Control de limpieza.                                      |  |         | X                      |        | X       |
| Reapretar los tornillos.                                  |  |         | X                      | X      | X       |
| <b>Equipamientos de protección y control.</b>             |  |         |                        |        |         |
| Testear el funcionamiento.                                |  |         | X                      | X      | X       |
| Verificar funcionamiento.                                 | X  |         |                        |        |         |
| <b>Equipo en general.</b>                                 |  |         |                        |        |         |
| Inspección del ruido y vibración.                         | X  |         |                        |        |         |
| Reapretar los tornillos.                                  |  |         |                        | X      | X       |
| Limpieza general externa.                                 |  |         | X                      | X      | X       |
| <b>Freno.</b>   |  |         |                        |        |         |
| Cambio de las pastillas.                                  | Conforme a las instrucciones de mantenimiento del dispositivo. |         |                        |        |         |
| Control funcional.  |  |         |                        |        |         |

Fuente: Elaboración propia.



## **M. INSTRUCCIONES DE MANTENIMIENTO:**

Logrando identificar las actividades de mantenimiento correspondientes en cada equipo y su frecuencia de realización, se procedió a realizar una serie de instrucciones específicas para que el operario se guíe y logre realizar de una mejor manera el trabajo a realizar.

Se describen las tareas de mantenimiento asociadas a cada equipo, explicando la manera correcta de realización de las actividades de trabajo, especificando procedimientos de limpieza, lubricación, calibración y testeo, según sea el caso.

A continuación, se presenta una serie de instrucciones que indica que se debe de utilizar y cómo se debe de realizar el mantenimiento, este estará dividido por sistemas y componentes auxiliares para tener una mejor identificación.

### **1. Instrucciones de mantenimiento de la turbina Pelton:**

Antes de realizar cualquier trabajo de mantenimiento en los componentes de la turbina es necesario vaciar la cámara de descarga, instalar iluminación, armar y asegurar un andamio con tablonés.

#### **a. Procedimiento de limpieza:**

Es necesario que este equipo esté completamente limpio, debido que siempre está en contacto con aguas relativamente sucias que pueden provocar deterioros o notables acciones abrasivas en los componentes, por la impregnación de lodo o algún otro sedimento.

- 1) Para la limpieza se debe de utilizar manta cruda y Wipe humedecidos con agua, si la suciedad está impregnada o se encuentra en zonas fuera del alcance, utilizar únicamente agua a presión.
- 2) Si los componentes presentan abrasión o tienen inicio de corrosión, se debe de utilizar rota limas o mopas para pulir.
- 3) La limpieza interna de la cámara de descarga se debe de realizar, utilizando escobas y palas de mano para retirar la acumulación de lodo y sedimentos.

#### **b. Procedimiento de inspección del estado del rodete con líquidos penetrantes:**

Esta inspección es necesaria realizarla, sirve para detectar e identificar defectos o discontinuidades que se presentan en el rodete de la turbina.

Para la realización de este procedimiento se debe de utilizar un compresor portátil para aplicar el líquido penetrante, es necesario utilizar mascarilla y guantes de protección para evitar el contacto directo con este solvente.

Los pasos a seguir para realizar esta inspección son los siguientes:

- 1) Preparar la superficie mediante limpieza previa del rodete, utilizando manta cruda y suficiente agua para retirar el lodo de la superficie.
- 2) Aplicar el líquido penetrante sobre la superficie limpia del rodete dejando transcurrir cierto tiempo para permitir la penetración del líquido en cualquier discontinuidad que se abra sobre la superficie.
- 3) Eliminar el penetrante, limpiando nuevamente esta vez superficialmente, de forma que asegure la permanencia del líquido en cualquier discontinuidad.
- 4) Aplicar solución reveladora para extraer el líquido penetrante de la imperfección hacia la superficie, dando así mayor realce y volviendo visibles los defectos.
- 5) Examinar visualmente los cangilones y cuerpo del rodete y evaluar bajo condiciones de visibilidad apropiadas.
- 6) Limpiar la pieza y realizar trabajo de pulido donde es requerido.

#### **c. Procedimiento de calibración de carrera de las agujas de los inyectores:**

Su finalidad es verificar el funcionamiento de apertura y cierre de las agujas, comprobando los valores obtenidos por el instrumento de medición (Vernier), con la medida correspondiente al patrón programado en el panel de control.

La distancia de operación permitida que deben de tener las agujas para un óptimo funcionamiento es la siguiente:

Tabla 39. Parámetros de carrera de aguja de inyectores.

| <b>Número de aguja.</b> | <b>Cierre al 0%</b> | <b>Apertura al 100%.</b> |
|-------------------------|---------------------|--------------------------|
| Aguja 1.                | 16.0 mm             | 110.0 mm                 |
| Aguja 2.                | 13.0 mm             | 105.0 mm                 |
| Aguja 3.                | 18.0 mm             | 111.5 mm                 |
| Aguja 4.                | 19.0 mm             | 112.5 mm                 |
| Aguja 5.                | 17.0 mm             | 111.0 mm                 |
| Aguja 6.                | 16.0 mm             | 109.0 mm                 |

Fuente: Elaboración propia.

La calibración se realiza midiendo el recorrido de las agujas en 0% y 100%, que es totalmente cerrado y abierto.

### 1) Medición en posición cerrada:

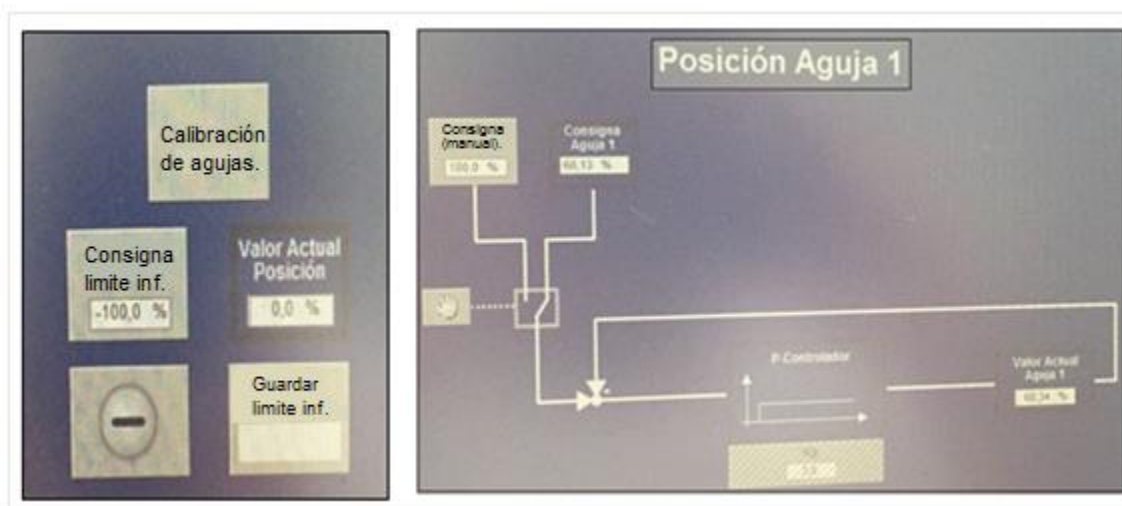
- Colocar en modo manual el funcionamiento de las agujas.
- Colocar la aguja en posición total de cierre (0%).
- Medir utilizando un vernier la distancia entre la punta de la aguja al dispositivo deflector.
- Verificar variación de carrera de cierre conforme a los parámetros establecidos de operación.

### 2) Medición en posición abierta:

- Colorar en modo manual el funcionamiento de las agujas.
- Colocar la aguja en posición de apertura total (100%).
- Medir utilizando un vernier la distancia entre el asiento de la aguja a la punta del mismo.
- Verificar variación de carrera de apertura conforme a los parámetros establecidos de operación.

Si la distancia medida, varía conforme a los parámetros permitidos, se debe de calibrar la posición desde el panel de control (ver Figura 24).

Figura 24. Pantalla de calibración de agujas en el panel de control de inyectores.



Fuente: Imagen captada en casa de máquinas de central hidroeléctrica estudiada, panel de control de calibración de agujas de inyectores de la turbina Pelton.

### d. Procedimiento de calibración de posición de los deflectores:

Para realizar la medición de posición de los deflectores es necesario utilizar un vernier, esto para obtener medidas precisas y exactas.

Su finalidad es garantizar que el deflector esté en posición céntrica con respecto a la punta de la aguja del inyector, es necesario que no esté corrido para que su funcionamiento sea óptimo.

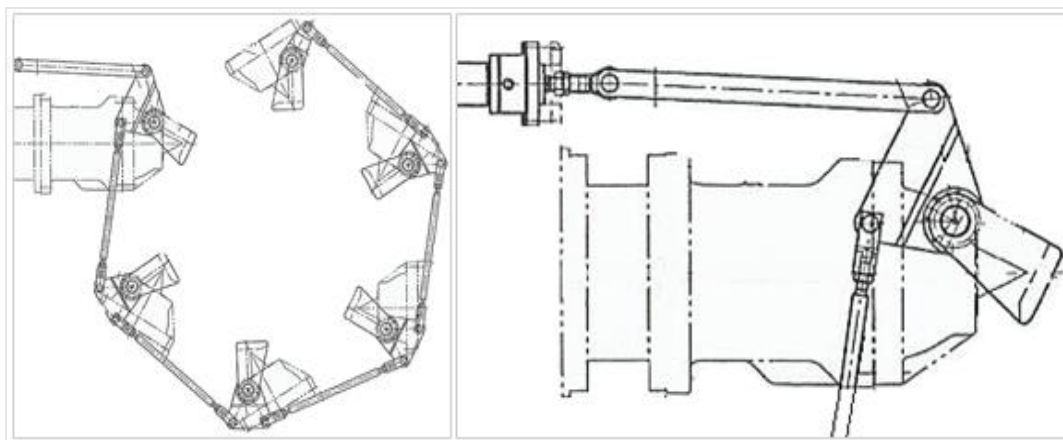
Los pasos a seguir para la medición de carrera son los siguientes:

- a. Colocar el deflector en posición cerrada.
- b. Medir la alineación entre el deflector y la punta de la aguja.
- c. Verificar variación con respecto a la posición céntrica de la punta de la aguja.

Si se encuentra desalineación, es necesario calibrar la articulación perteneciente al deflector que se está midiendo, para ello se debe realizar lo siguiente:

- a. Aflojar el tornillo de sujeción entre el casquillo deflector y la articulación.
- b. Mover manualmente la distancia necesaria en la corredera del deflector hasta llegar al punto céntrico.
- c. Verificar la alineación conforme a la punta de la aguja del inyector.
- d. Apretar el tornillo de sujeción del casquillo deflector y la articulación.

Figura 25. Esquema de articulación de los deflectores de la turbina.



Fuente: Andritz Hydro, Plano dimensional de la turbina Pelton, deflector completo, (2013:1).

## 2. Instrucciones de mantenimiento, válvula principal de entrada:

Esta válvula no requiere de ningún mantenimiento especial. Sin embargo, las actividades que fueron descritas anteriormente en el cronograma se deben de realizar en la fecha indicada, para poder garantizar su óptimo funcionamiento.

A continuación, se especifican los procedimientos de limpieza, lubricación y purga del sistema oleo hidráulico de la válvula principal de entrada, estas indicaciones se deben de ejecutar con el equipo apagado.

**a. Procedimiento de limpieza:**

El cuerpo y los componentes de este equipo deben de permanecer limpios, libres de polvo, detritos, lubricantes y humedad.

- 1) Para la limpieza se debe de utilizar ya sea brochas o paños limpios de algodón libres de pelusa, si la suciedad está impregnada o se encuentra en zonas fuera del alcance, utilizar únicamente aire comprimido.
- 2) Si los detritos están impregnados con aceite o humedad, pueden ser removidos utilizando un paño humedecido en desengrasante alcalino liquido soluble en agua u otro solvente adecuado para eliminar aceites, grasas o humedad.
- 3) La limpieza interna de la caja de conexiones y dispositivos electrónicos se debe de realizar, utilizando aire comprimido, brochas y/o solventes dieléctricos que garanticen una limpieza total sin daños en el equipo, un secado rápido, evitando corrosiones y la extracción de humedad.

**b. Procedimiento de lubricación:**

- 1) Todos lo cojinetes de la válvula y del actuador hidráulico, son auto lubricados por lo que no requieren ser engrasados.
- 2) El cilindro hidráulico de doble efecto tiene un sello de bola al final del eje. Se debe asegurar la lubricación correcta de la bola, mediante la utilización de un lubricador.
- 3) Lubricación a zonas expuestas a desgaste u oxidación.

La lubricación de los componentes se debe de realizar utilizando únicamente grasa.

**c. Procedimiento de purga del circuito oleo hidráulico:**

Se debe de eliminar el aire del circuito oleo hidráulico, la presencia de este impide una buena operación y causa un rápido deterioro de los sellos.

Para purgar el circuito es necesario realizar una serie de pasos:

- 1) Poner el contrapeso en posición horizontal.
- 2) Desatornillar las tapas de drenaje de las cámaras de presión.
- 3) Establecer presión de aceite hasta que el mismo escape de la cámara del cilindro.
- 4) Cerrar la tapa de drenaje de la cámara superior.
- 5) El circuito está purgado.

### **3. Instrucciones de mantenimiento de la unidad de presión hidráulica (HPU):**

#### **a. Procedimiento de limpieza:**

##### **1) Limpieza general:**

La limpieza externa de los componentes del HPU se debe de realizar de la siguiente manera:

- a) La estructura, el tanque, la tubería rígida y los componentes de este equipo deben de permanecer limpios, libres de polvo, residuos, aceite y humedad.
- b) Para asegurar que no quede ningún rastro de pelusa, es necesario realizar la limpieza utilizando manta cruda o wipe.
- c) Si presenta residuos o polvo impregnado con aceite o humedad, removerla mediante aire comprimido o utilizando una aspiradora.
- d) La limpieza general del tablero de conexión, equipos y accesorios de medición y control se debe de realizar mediante la aplicación de solvente dieléctrico y manta cruda.

##### **2) Limpieza de los motores asíncronos de bombas:**

Los motores deben de mantenerse limpios, libres de polvo, detritos y aceites, para limpiarlos se debe de utilizar los siguiente:

- a) Brocha o pincel.
- b) Manta cruda de algodón.
- c) Soplete de aire comprimido.

Si el polvo no es abrasivo se debe de utilizar el soplete de aire comprimido para retirar la suciedad de la tapa deflectora, es necesario eliminar todo el polvo contenido en las aletas del ventilador y en las de refrigeración, esto para evitar el sobrecalentamiento del motor.

La limpieza del rotor, el bobinado del estator y los componentes internos se debe de realizar mediante brochas o pincel y si es necesario se debe aplicar solvente dieléctrico adecuado para retirar cualquier suciedad que esté adherida sobre ellos, luego de la aplicación de este se debe de secar completamente con aire comprimido o a temperatura ambiente.

El eje del estator debe de ser pulido utilizando una lija de papel fina, para eliminar suciedad y corrosión.

El interior de la caja de conexión debe de presentar bornes limpios sin oxidación y sin acumulación de polvo en los espacios vacíos, la limpieza se realiza utilizando solvente dieléctrico y una brocha o pincel. Si las terminales de argolla de las líneas del bobinado del motor, las líneas de potencia o las de aterrizaje a tierra están dañadas, se recomienda reemplazarlas por unas en buen estado.

Al finalizar los trabajos de limpieza es necesario medir la resistencia de aislamiento y polarización para garantizar que esté libre de humedad.

### 3) Limpieza de la bomba de engranajes:

Para realizar el procedimiento de limpieza a la bomba de engranajes es necesario desacoplar la junta del motor con la de la bomba.

La limpieza interna se debe de realizar únicamente con manta cruda o wipe libre de pelusa, eliminando cualquier partícula de suciedad y detritos.

Figura 26. Motor de bomba de engranajes de la unidad de presión hidráulica.



Fuente: Imagen captada en casa de máquinas de central hidroeléctrica estudiada, área de unidad de presión hidráulica (HPU).

#### b. Procedimiento de lubricación:

##### 1) Lubricación al tanque de la unidad de presión hidráulica (HPU):

El tipo de lubricante que utiliza el tanque del HPU es, aceite hidráulico Shell Tellus TD 46 con propiedades detergentes y elevado índice de viscosidad.

Las características técnicas de este lubricante están descritas en la Tabla 40, que se presenta a continuación.

Tabla 40. Características técnicas del lubricante del tanque del HPU.

| Característica.             | Método.     | Valores típicos. |
|-----------------------------|-------------|------------------|
| Grado de viscosidad ISO.    | -           | 46               |
| Densidad a 15 °C, kg/l.     | ISO 12185.  | 0.872.           |
| Viscosidad cinemática, cSt. | ASTM D 445. | -                |
| A 40 °C.                    | -           | 47               |
| A 100 °C.                   | -           | 9.3              |
| Índice de viscosidad.       | ISO 2909.   | 185.             |
| Punto de inflamación.       | ISO 2592.   | 190 °C.          |
| Punto de congelación.       | ISO 3016.   | -54 °C.          |

Fuente: Boletín técnico de lubricante TD 46, (pág. 2).

El tanque tiene una capacidad de llenado de aceite de 190 litros, los pasos a seguir para realizar el cambio son los siguientes:

- a) Colocar un recipiente debajo de la tapa de salida de aceite, para depositar y así evitar derrames.
- b) Abrir la llave de salida de aceite y drenarlo completamente.
- c) Cerrar la llave de salida de aceite.
- d) Remover la tapa de entrada de aceite, que se encuentra en la parte superior del tanque hidráulico (ver Figura 27).
- e) Colocar la cantidad recomendada de aceite hidráulico hasta el nivel indicado, con ayuda de una bomba de lubricación para evitar derrames o vertimientos.
- f) Cerrar la tapa de entrada de aceite.

Figura 27. Nivelación de lubricante del tanque HPU.



Fuente. Imagen captada en casa de máquinas de central hidroeléctrica estudiada, unidad de presión hidráulica (HPU).

## 2) Lubricación de cojinetes del motor de la bomba:

Estos motores poseen cojinetes auto lubricados, esto quiere decir que son libres de mantenimiento, permitiéndole trabajar al motor durante una gran cantidad de horas sin desgaste.

La Tabla 41, indica las características técnicas de los cojinetes del motor.

Tabla 41. Características técnicas de cojinetes de bombas de engranajes de la unidad de presión hidráulica.

| Cojinete:             | Cantidad.                    | Intervalo de lubricación:                | Vida útil estimada (horas trabajadas): |
|-----------------------|------------------------------|--|--|
| Sellado de bola 1204. | 2.<br>(superior e inferior). | Auto lubricado (libre de mantenimiento). | 26280h.                                |

Fuente: Placa del motor de engranaje en bomba de unidad de presión hidráulica (HPU).

### c. Procedimiento de cambio de cojinetes del motor de bomba de engranajes:

Para realizar el cambio de los cojinetes es necesario desmontar y desarmar completamente el motor para poder retirar el rotor y extraer los mismos.

El desmontaje se debe de hacer con un extractor de 3 garras para garantizar su sujeción.

Es necesario colocar el rotor en una prensa de banco para facilitar la extracción, las garras del extractor se colocan sobre la base lateral del rodamiento que será desmontado y con ayuda de una herramienta manual se extrae el cojinete gradualmente.

Antes de la colocación de un cojinete nuevo es necesario corregir cualquier imperfección que se encuentre en el asiento y en el rotor, para ello debemos de utilizar una lija fina para pulir las señas de rebaba o golpes.

Para no dañar el cojinete durante su montaje se recomienda utilizar un martillo de goma y un trozo de madera, dando leves golpes, cuidando su alineación. Si es necesario pueden ser calentados para facilitar el montaje.

### d. Procedimiento de medición de resistencia de aislamiento del motor:

La resistencia del aislamiento de las bobinas debe ser medida después de finalizar los trabajos de mantenimiento, ella varía dependiendo de las condiciones ambientales, condiciones de limpieza y condiciones del material aislante utilizado.

El proceso de medición se realiza mediante un megóhmetro. Antes de realizar el proceso de medición hay que garantizar que la temperatura de la bobina sea de 40 °C.

Según la asociación internacional de pruebas eléctricas (NETA), descrita en la comprobación de resistencia de aislamiento (2015:3), los valores mínimos de prueba y aislamiento recomendados para las distintas tensiones nominales de los equipos son los siguientes:

Tabla 42. Valores de prueba y aislamiento de resistencia de motores.

| <b>Tensión nominal del equipo.</b> | <b>Tensión de prueba de CC de resistencia de aislamiento mínima.</b> | <b>Resistencia de aislamiento mínima recomendada en megaohmios.</b> |
|------------------------------------|--|---|
| 250.                               | 500.   | 25.   |
| 600.                               | 1000.  | 100.  |
| 1000.                              | 1000.  | 100.  |
| 5000.                              | 2500.  | 1000.   |
| 15000.                             | 2500.  | 5000.   |

Fuente: Asociación internacional de pruebas eléctricas (Neta), (2015:3).

Para conocer la criticidad de los resultados de la resistencia de aislamiento evaluada debemos de basarnos en la norma IEEE 43-2000, descrita a continuación en la Tabla 43.

Tabla 43. Parámetros de evaluación de aislamiento de resistencia.

| <b>Valor de la resistencia del aislamiento.</b> | <b>Evaluación del aislamiento.</b> |
|---|------------------------------------|
| 2MΩ o menor.                                    | Malo                               |
| < 50MΩ.   | Peligroso                          |
| 50 a 100MΩ.                                     | Regular.                           |
| 100 a 500MΩ.                                    | Bueno.                             |
| 500 a 1000MΩ.                                   | Muy bueno.                         |
| > 1000MΩ.                                       | Excelente.                         |

Fuente: Norma IEEE 43-2000.

Para realizar la medición de aislamiento en el motor de la bomba de engranajes del HPU, debemos de asegurarnos antes de desconectar los cables de alimentación, para luego seleccionar la tensión de prueba que se aplicará al Megger mediante la utilización de la Tabla 42.

Las lecturas y registros de valores de resistencia se registran después de transcurrir un minuto en las líneas testeadas. Luego de medir la resistencia de aislamiento se debe de poner a tierra la bobina testada para descargarla y proceder con la siguiente.

Al finalizar la medición se deben de definir los resultados de la evaluación, conforme al rango especificado (ver Tabla 43).

A continuación, se definen los pasos para realizar la correcta medición de resistencia de aislamiento.

### 1) Medición de resistencia de aislamiento:

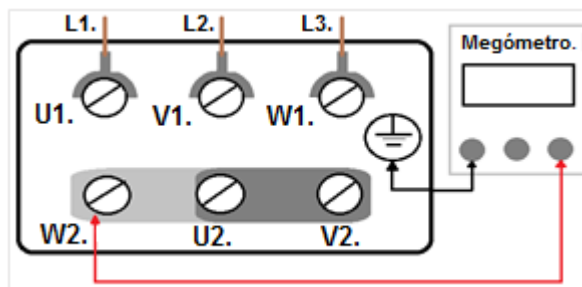
La medición de resistencia de aislamiento se debe de realizar de dos distintas maneras:

#### a) Medición de resistencia de aislamiento eléctrico, fases con tierra:

Se debe de conectar una pinza del megóhmetro a una tierra en la carcasa del motor y la otra que es la pinza activa se conecta a cada fase durante un tiempo determinado para hacer la lectura (ver Figura 28).

1. Línea 1 con tierra durante 60 segundos.
2. Línea 2 con tierra durante 60 segundos.
3. Línea 3 con tierra durante 60 segundos.

Figura 28. Medición de resistencia de aislamiento, fases con tierra.



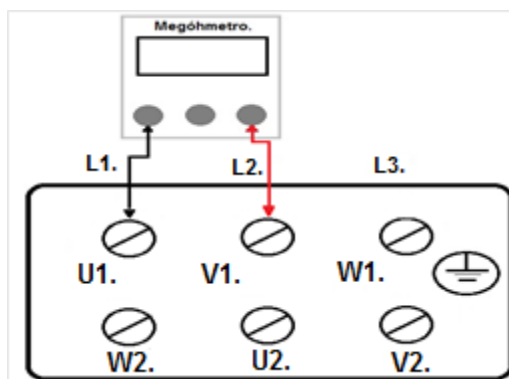
Fuente: Elaboración propia.

#### b) Medición de resistencia de aislamiento eléctrico entre fases:

Se debe de realizar aplicando una pinza activa del megóhmetro en una fase y la otra en una fase distinta (ver Figura 29).

1. Línea 1 con línea 2 durante 60 segundos.
2. Línea 1 con línea 3 durante 60 segundos.
3. Línea 2 con línea 3 durante 60 segundos.

Figura 29. Medición de resistencia de aislamiento, entre fases.



Fuente: Elaboración propia.

**e. Procedimiento de cambio y mantenimiento de dispositivos de filtración:**

Antes de instalar los filtros en el HPU, hay que verificar que la presión de operación del sistema no supere la presión de funcionamiento permitida del filtro.

Al cambiar un elemento filtrante, se debe observar un alto nivel de limpieza, es necesario mantener limpias las herramientas, el área de trabajo y el equipo que se va a utilizar, después de desmontar el filtro, se limpian todas las piezas, verificando daños y desgastes.

**1) Regulador y elemento de filtración de presión de aceite:**

Este va instalado en la línea principal del sistema hidráulico, su función es proteger los componentes del sistema del daño causado por partículas contaminantes presentes en el fluido.

Este regulador de presión tiene instalado un indicador de obstrucción electrónico (sensor), para monitorear el estado del elemento filtrante, este indica cuando es necesario cambiar o limpiar el filtro sin demora.

La Tabla 44, describe las características técnicas del regulador y el elemento filtrante.

Tabla 44. Datos técnicos del regulador de presión del sistema hidráulico.

| <b>Descripción:</b>             | <b>Referencia:</b> | <b>Vida útil estimada (horas trabajadas).</b> |
|---------------------------------|--------------------|---|
| Regulador de presión de aceite. | MDF60              | -   |
| Elemento filtrante.             | 0060D010BH4HC.     | 8760h   |

Fuente: Hydac, Ficha técnica del regulador de presión de aceite.

**a) Desmontaje del elemento filtrante:**

1. Apagar el sistema hidráulico y liberar la presión del filtro.
2. Retirar el tapón de drenaje de aceite y Drenar el aceite en el contenedor.
3. Desatornillar el recipiente de filtro.
4. Retirar el elemento filtrante de la espita del regulador y verificar la superficie del elemento en busca de residuos de contaminación y partículas más grandes, que pueden indicar daños en el componente.
5. Reemplazar o limpiar el elemento filtrante.
6. Limpiar cuidadosamente la taza del regulador y la cabeza del filtro.
7. Examinar el filtro, especialmente las superficies de sellado, para detectar daños mecánicos.
8. Verificar las juntas tóricas reemplazando las piezas si es necesario.

### b) Montaje del elemento filtrante:

1. Humedecer las superficies de sellado con aceite limpio y enroscar la cabeza del filtro, la taza, la junta tórica.
2. Colocar el elemento de filtro con cuidado en la espita del regulador.
3. Atornillar el recipiente del filtro por completo.
4. Atornillar el tapón de drenaje de aceite.
5. Desenroscar la taza del filtro un cuarto de vuelta.
6. Encender el sistema hidráulico y el filtro de ventilación en un punto adecuado del sistema.
7. Verificar que el filtro no tenga fugas.

Figura 30. Regulador y filtro de presión de aceite de la unidad de presión hidráulica.



Fuente: Imagen captada en casa de máquinas de la central hidroeléctrica estudiada, Unidad de presión hidráulica.

### 2) Filtro de línea de retorno:

Su finalidad es retener las partículas generadas en el interior del equipo, extrayéndolas del circuito hidráulico y previniendo la contaminación del aceite a través del tanque y las bombas.

La Tabla 45, describe los datos técnicos del regulador y el elemento filtrante.

Tabla 45. Datos técnicos de filtro de línea de retorno.

| Descripción:        | Referencia:      | Vida útil estimada (horas trabajadas). |
|---------------------|------------------|--|
| Filtro de retorno.  | RFM165BD01BN4HC. | -                                      |
| Elemento filtrante. | 0165-R-010-BN4HC | 8760h                                  |

Fuente: Hydac, Ficha técnica de filtro de retorno.

**a) Desmontaje del elemento filtrante:**

1. Apagar el sistema hidráulico y liberar la presión del filtro.
2. Desatornillar la cubierta.
3. Extraer el elemento del filtro con la carcasa conectada a la manija.
4. Retirar el elemento filtrante con el retenedor de suciedad.
5. Examinar la superficie del elemento en busca de residuos de suciedad y partículas más grandes, pueden indicar daños en el componente.
6. Retirar el retenedor de suciedad girando en sentido contrario a las agujas del reloj.
7. Reemplazar o limpiar el elemento filtrante.
8. Limpiar la carcasa, la tapa y el retenedor de suciedad.
9. Examinar el filtro, especialmente las superficies de sellado, para detectar daños mecánicos.
10. Verificar las juntas tóricas y reemplazarlas si es necesario.

**b) Montaje del elemento filtrante:**

1. Mojar las superficies de sellado en la carcasa del filtro, la cubierta, la junta tórica, con aceite limpio.
2. Colocar el retenedor de suciedad en el elemento de filtro nuevo o limpio, girándolo en el sentido de las agujas del reloj.
3. Colocar el elemento de filtro con cuidado en la espiga del elemento en la carcasa o atorníllelo en la carcasa.
4. Instalar el elemento de filtro con la carcasa adjunta.
5. Colocar la tapa y apretar con el par de apriete apropiado.
6. Encender el sistema hidráulico y el filtro de ventilación en un punto adecuado del sistema.
7. Verificar que el filtro no tenga fugas.

Figura 31. Elemento filtrante del dispositivo de retorno de la unidad de presión hidráulica.



Fuente: Imagen captada en bodega de materiales de la central hidroeléctrica estudiada.

### 3) Filtro de ventilación del tanque:

Su finalidad es retener cualquier impureza o partícula al momento de realizar el cambio de aceite en el tanque, este filtro se encuentra situado dentro del tanque acoplado a la tapadera de entrada de aceite. La Tabla 46, muestra los datos técnicos del regulador y el elemento filtrante.

Tabla 46. Datos técnicos del filtro de ventilación del tanque HPU.

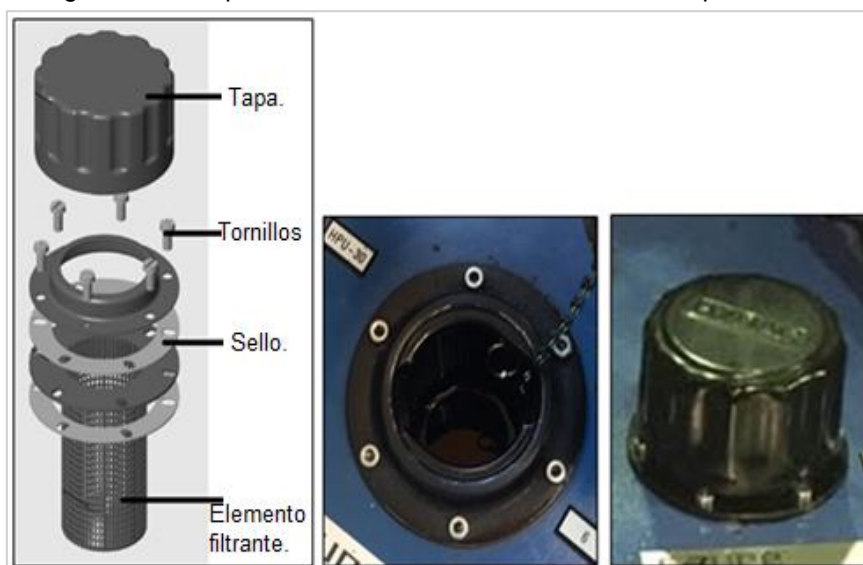
| Descripción:           | Referencia: | Vida útil estimada (horas trabajadas). |
|------------------------|-------------|--|
| Filtro de ventilación. | ELFP3F10W.  | -                                      |
| Elemento filtrante.    | 01261627.   | 17520h.                                |

Fuente: Hydac, Ficha técnica de filtro de ventilación del tanque.

#### a) Cambio de elemento filtrante:

1. Desenroscar la tapa manualmente girando en sentido anti horario.
2. Remover los tornillos de sujeción con el tanque.
3. Remover el sello del elemento filtrante.
4. Retirar el elemento filtrante.
5. Reemplazar o limpiar el elemento (la limpieza se realiza a base de aire comprimido).
6. Colocar nuevamente el sello del elemento filtrante.
7. Colocar los tornillos de sujeción con el tanque.
8. Enroscar la tapa nuevamente de forma manual.

Figura 32. Componentes del filtro de ventilación del tanque del HPU.



Fuente: Imagen captada en casa de máquinas de central hidroeléctrica estudiada, ficha técnica de elemento filtrante de ventilación del tanque.

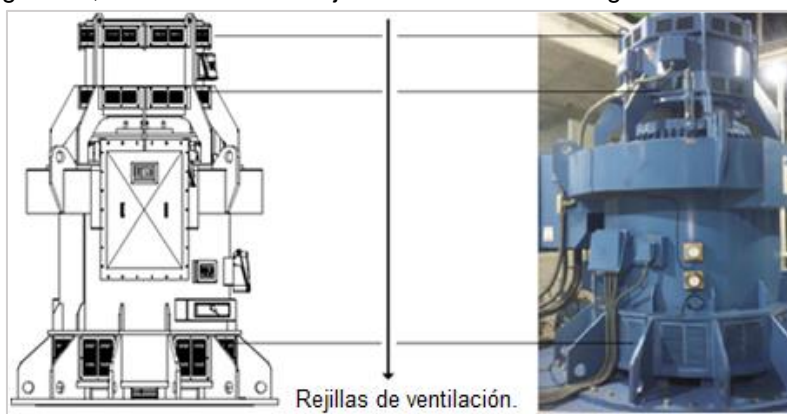
#### 4. Instrucciones de mantenimiento de la maquina sincrónica:

##### a. Procedimiento de limpieza:

Para la limpieza del generador y la excitatriz, se deben de utilizar los siguientes elementos, para evitar el daño de los componentes del equipo. Manta cruda 100% algodón y libre de pelusa, solvente dieléctrico, aire comprimido y una aspiradora de polvo Industrial. El interior del generador debe ser mantenido limpio, libre de polvo, detritos y lubricantes, para ello es necesario retirar todas las rejillas de ventilación.

- 1) La máquina sincrónica por tener un sistema de refrigeración, abierto autoventilado, se debe de mantener limpia, sin acumulación de aceite o polvo en la parte exterior de la carcasa, específicamente las rejillas de ventilación (ver Figura 33), esto para facilitar el intercambio de calor con el medio ambiente.

Figura 33, Ubicación de las rejillas de ventilación del generador síncrono.



Fuente: Elaboración propia.

- 2) Si los detritos están impregnados con aceite o humedad, pueden ser removidos utilizando manta cruda de algodón, humedecida en solvente dieléctrico que garantice un secado rápido y libre de residuos.
- 3) La limpieza de las 6 cajas de conexión y los dispositivos electrónicos se debe de realizar utilizando un solvente dieléctrico, manta cruda o una brocha y si es necesario una aspiradora para extraer residuos de polvo acumulados en los espacios vacíos.
- 4) La bobina debe de ser limpiada utilizando, aspiradora de polvo industrial o con manta cruda de algodón. Si la bobina tiene residuos impregnados se puede realizar la limpieza utilizando solvente dieléctrico de secado rápido.
- 5) Se debe de asegurar que la bobina quede completamente seca después de la aplicación del solvente, para ello es necesario medir la resistencia de aislamiento y polarización para garantizar que esté libre de humedad.

## b. Procedimiento de lubricación:

Los cojinetes son las únicas piezas que necesitan lubricación en este equipo, para ello es necesario conocer las características del cojinete (ver Tabla 47).

Tabla 47. Características de los cojinetes del generador síncrono.

| Cojinete. |        | Intervalo de lubricación. | Cantidad de lubricante. | Tipo de lubricante.    | Vida útil estimada. (Horas trabajadas). |
|-----------|--------|---------------------------|-------------------------|------------------------|---|
| Inferior  | NU1052 | 2690 h.                   | 130 g.                  | Grasa Staburags N12MF. | 100000 h.                               |
| Superior  | 29348  | 8000 h.                   | 85l.                    | Aceite Iso VG-100.     | 100000 h.                               |

Fuente: Placa de generador síncrono de central hidroeléctrica estudiada.

### 1) Lubricación de cojinete superior a aceite:

La lubricación de este cojinete se realiza con el generador totalmente apagado. Los pasos a seguir para realizar una correcta lubricación del cojinete de aceite son los siguientes:

- a) Colocar un recipiente bajo la tapa de drenaje, para depositar y evitar derrames.
- b) Remover la tapa de la salida de aceite (ver Figura 34) lentamente y vaciarlo completamente.
- c) Cerrar la tapa de la salida de aceite.
- d) Remover la tapa de la entrada del aceite (ver Figura 34), que se encuentra en la parte superior del visor de nivel.
- e) Colocar la cantidad recomendada de aceite (ISO VG-100) hasta el nivel indicado que son 85 litros, con ayuda de una bomba de lubricación para evitar derrames o vertimientos.
- f) Cerrar la tapa de entrada de aceite.

Figura 34. Lubricación de cojinete superior de aceite del generador síncrono.



Fuente: Imagen captada en casa de máquinas de central hidroeléctrica estudiada., área superior de generador síncrono, nivel de aceite.

## 2) Lubricación de cojinete inferior a grasa:

La eliminación de la grasa vieja es efectuada por un dispositivo con gaveta instalado en el cojinete. Su lubricación se realiza con el generador en funcionamiento.

Los pasos a seguir para realizar una correcta lubricación del cojinete de grasa son los siguientes:

- a) Limpiar el engrasador (ver Figura 35), utilizando un paño de algodón libre de pelusa.
- b) Retirar la varilla de salida (ver Figura 35), para la eliminar la grasa vieja, limpiarla y colocarla nuevamente.
- c) Inyecte la cantidad recomendada de 130 gramos de grasa (Staburags N12MF), utilizando una engrasadora manual.
- d) El exceso de grasa sale por el drenaje inferior del cojinete y se deposita en la gaveta.
- e) Mantener en funcionamiento el generador durante un tiempo suficiente para que el exceso de grasa salga.
- f) Remover la grasa jalando la varilla de la gaveta y limpiándola, repetir este paso hasta asegurar que la gaveta ya no retenga más grasa.
- g) Inspeccionar la temperatura del cojinete, para asegura que no hubo problema alguno.

Figura 35. Lubricación de cojinete inferior a grasa del generador síncrono.



Fuente: Imagen captada en casa de máquinas de la central hidroeléctrica estudiada, gabinete de lubricación del cojinete de generador síncrono.

**c. Procedimiento de testeo y medición de dispositivos y componentes:**

A continuación, se explica mediante una serie de instrucciones la forma correcta de realizar el testeo y medición de dispositivos y componentes de la maquina sincrónica, estas actividades se realizan con el generador totalmente apagado.

**1) Test de diodos de la excitatriz:**

Cada diodo debe de ser medido en ambas direcciones utilizando un dispositivo que mida su resistencia óhmica, para considerar que un diodo está en buen estado es necesario que cumpla las siguientes condiciones:

**a) Diodo en buen estado:**

1. Baja resistencia óhmica hasta un  $\pm 100 \Omega$  en dirección directa.
2. Alta resistencia óhmica aproximadamente  $1 M\Omega$  en la dirección contraria.

**b) Diodo en mal estado:**

1. Resistencia óhmica de  $0\Omega$  o mayor a  $1M\Omega$  en ambas direcciones medidas.

**2) Test de Varistores de la excitatriz:**

Para testear las condiciones de los varistores se utilizará un dispositivo que mida resistencia óhmica, para considerar que un varistor se encuentra en buen estado es necesario que tenga su resistencia muy alta aproximadamente de  $\pm 20.000 \Omega$ . Si su resistencia es muy baja o presenta daños, este debe de ser sustituido.

**3) Medición de resistencia de aislamiento o prueba de Megger:**

Para realizar la medición de la resistencia de aislamiento, el generador debe de estar desconectado y apagado completamente.

**a) Finalidad:**

Verificar el estado de la resistencia, midiendo el aislamiento del bobinado en relación a la masa metálica del motor. La prueba de resistencia de aislamiento se realiza dos veces, antes y después de los procedimientos de mantenimiento, para verificar si hay variación alguna por consecuencia del polvo o humedad excesiva.

**b) Procedimiento:**

Para realizar el proceso de medición es necesario utilizar un megóhmetro cuyo fondo de escala sea mínimo 500V.

1. Desconectar los cables de alimentación.
2. Se aplica tensión continua del megóhmetro, específicamente 2500V.
3. Efectuar lecturas y registros de valores de resistencia después de 30 segundos, 1 minuto y 10 minutos.
4. Luego de medir la resistencia de aislamiento se debe de poner a tierra la bobina testada para descargarla y proceder con la siguiente.
5. Realizar los cálculos descritos en la tabla 48, para obtener los valores del índice de polarización (PI) y el índice de absorción (DAR).
6. Definir los resultados de la evaluación de aislamiento, conforme al rango especificado (ver Tabla 49).

Tabla 48. Fórmula para calcular el índice de polarización y absorción.

| Fórmula.                     |                                |  |
|------------------------------|--------------------------------|--|
| Índice de polarización (PI): | $\frac{R_{10min.}}{R_{1min.}}$ | Donde <i>R</i> es: resistencia de aislamiento en determinado tiempo. |
| Índice de absorción (DAR).   | $\frac{R_{1min.}}{R_{30seg.}}$ |  |

Fuente: Norma IEEE 43-2000.

Los rangos para definir la criticidad de aislamiento, están basados en la norma certificada IEEE 43-2000, que describe el procedimiento recomendado para la medición de resistencia de aislamiento e índice de polarización en máquinas rotativas.

Tabla 49. Rango de resultados del índice de polarización y absorción.

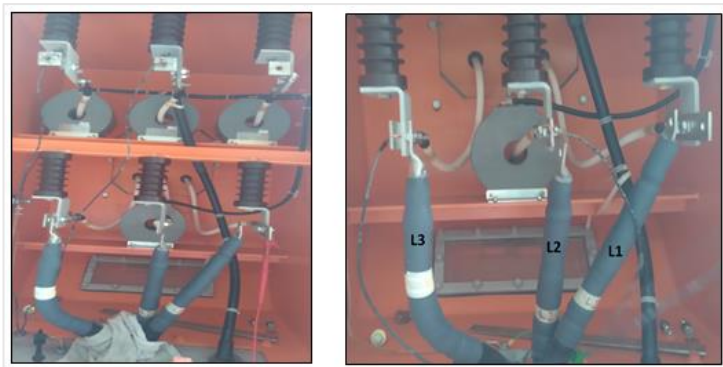
| Rango de resultados.       |                              |                           |
|----------------------------|------------------------------|---------------------------|
| Índice de absorción (DAR). | Índice de polarización (PI). | Condición de aislamiento. |
| -                          | ≤1                           | Inaceptable.              |
| < 1.1                      | < 1.5                        | Peligroso.                |
| 1.1 a 1.25                 | 1.5 a 2.0                    | Regular.                  |
| 1.25 a 1.4                 | 2.0 a 3.0                    | Bueno.                    |
| 1.4 a 1.6                  | 3.0 a 4.0                    | Muy bueno.                |
| > 1.6                      | > 4.0                        | Óptimo.                   |

Fuente: Norma IEEE 43-2000.

### c) Medición y registro de valores:

Los valores de resistencia se obtendrán aplicando 2500V con el Megóhmetro, la medición de las bobinas debe de ser realizada en la caja de conexión principal (ver Figura 36) de la maquina sincrónica.

Figura 36. Caja de conexión principal del generador.



Fuente: Imagen captada en caja de conexión principal del generador síncrono.

Cada fase debe de ser aislada y testeada separadamente, esto permite la comparación entre cada una, mientras una fase está en proceso de medición las otras dos deben de ser puestas en la misma tierra de la carcasa, a continuación, se explican las combinaciones a realizar entre cada fase:

1. **Línea 1:**
  - a. L1 – tierra durante 30 segundos.
  - b. L1 – tierra durante 60 segundos.
  - c. L1 – tierra durante 10 minutos.
2. **Línea 2:**
  - a. L2 – tierra durante 30 segundos.
  - b. L2 – tierra durante 60 segundos.
  - c. L2 – tierra durante 10 minutos.
3. **Línea 3:**
  - a. L3 – tierra durante 30 segundos.
  - b. L3 – tierra durante 60 segundos.
  - c. L3 – tierra durante 10 minutos.
4. **Línea 1 con línea 2:**
  - a. L1 – L2 durante 30 segundos.
  - b. L1 – L2 durante 60 segundos.
  - c. L1 – L2 durante 10 minutos.
5. **Línea 1 con línea 3:**
  - a. L1 – L3 durante 30 segundos.
  - b. L1 – L3 durante 60 segundos.
  - c. L1 – L3 durante 10 minutos.
6. **Línea 2 con línea 3:**
  - a. L2 – L3 durante 30 segundos.
  - b. L2 – L3 durante 60 segundos.
  - c. L2 – L3 durante 10 minutos.

#### d. Instrucciones de mantenimiento del sistema de frenado:

El sistema de frenado es accionado hidráulicamente, el cambio se realiza cuando la pastilla llega a medir aproximadamente 2mm o el sensor de la pastilla deja de detectar. Si la indicación de freno no desactiva, hay que comprobar visualmente si la pastilla retornó correctamente o el sensor inductivo está bien ajustado.

Los pasos a seguir para realizar el cambio de pastillas son los siguientes:

- 1) Desmontar las rejillas de ventilación inferiores del generador para poder visualizar a detalle el freno.
- 2) Identificar la pastilla de freno.
- 3) Retirar los 6 tornillos de sujeción laterales de la pastilla.
- 4) Retirar chapas metálicas de sujeción.
- 5) Para poder extraer la pastilla es necesario hacer palanca en la pastilla con los bordes del disco (nunca sobre la superficie del mismo).
- 6) Limpiar el brazo de soporte de las pastillas y los componentes del sistema con manta cruda o wipe para evitar dejar pelusa.
- 7) Montar las nuevas pastillas (estas entrarán a presión), cuando estén dentro hay que colocar las chapas metálicas de sujeción.
- 8) Colocar los tornillos de sujeción y ajustarlos.

Figura 37. Pastillas de freno del generador.



Fuente: Imagen captada en casa de máquinas de central hidroeléctrica estudiada, interior de generador síncrono.

## N. INDICADORES DE GESTIÓN DEL MANTENIMIENTO:

Para asegurar la efectividad y el control de la gestión del mantenimiento, se ha propuesto implementar un sistema de medición, estableciendo indicadores de manera cuantitativa, enfocados en la disponibilidad y que permitan de esta manera evaluar la disponibilidad de la central hidroeléctrica por medio de un control en el mantenimiento.

### 1. Indicadores a implementar:

Los indicadores que se implementarán para darle seguimiento a la gestión del mantenimiento son los siguientes:

#### a. Tiempo medio entre fallas (MTBF):

Permite conocer la frecuencia con que se presentan la averías.

$$\text{MTBF} = \frac{\text{Tiempo programado} - \text{Tiempo de parada por averías.}}{\text{Cantidad de fallas.}} \text{ horas/falla.}$$

Fórmula 1.

#### b. Tiempo medio de recuperación entre fallas (MTTF):

Mide el tiempo promedio para volver a poner el equipo en operación, se mide el tiempo transcurrido desde el momento en que se presenta la falla hasta que se repara.

$$\text{MTTF} = \frac{\text{Tiempo de parada por averías.}}{\text{Cantidad de fallas.}} \text{ horas/falla.}$$

Fórmula 2.

#### c. Disponibilidad total:

Indica la disponibilidad de trabajo de un equipo o sistema, está representado mediante un porcentaje real de utilización.

$$\text{Disponibilidad} = \frac{\text{MTBF}}{(\text{MTBF} + \text{MTTF})} \%$$

Fórmula 3.

## 2. Aplicación de indicadores:

Para conocer la disponibilidad, se evaluaron los datos del historial de fallas del año 2017 identificados anteriormente en esta investigación.

A continuación, se muestran los datos ya analizados, después de aplicar los tres indicadores mencionados en esta investigación, para conocer la disponibilidad de la central hidroeléctrica durante el periodo de 12 meses.

Tabla 50. Indicadores de disponibilidad mensual, promedio del año 2017.

| <b>Disponibilidad de generación 2017.</b> |             |              |                          |                       |                          |                           |             |             |                       |
|---|-------------|--------------|--------------------------|-----------------------|--------------------------|---------------------------|-------------|-------------|-----------------------|
| <b>Mes</b>                                | <b>Días</b> | <b>Horas</b> | <b>Tiempo programado</b> | <b>Tiempo perdido</b> | <b>Tiempo disponible</b> | <b>Cantidad de fallas</b> | <b>MTBF</b> | <b>MTTF</b> | <b>Disponibilidad</b> |
| Enero                                     | 31          | 24           | 744                      | 2.97                  | 741.03                   | 10                        | 74.10       | 0.30        | 99.60%                |
| Febrero                                   | 28          | 24           | 672                      | 1.50                  | 670.50                   | 7                         | 95.79       | 0.21        | 99.78%                |
| Marzo                                     | 31          | 24           | 744                      | 7.75                  | 736.25                   | 9                         | 81.81       | 0.86        | 98.96%                |
| Abril                                     | 30          | 24           | 720                      | 7.83                  | 712.17                   | 7                         | 101.74      | 1.12        | 98.91%                |
| Mayo                                      | 31          | 24           | 744                      | 4.57                  | 739.43                   | 9                         | 82.16       | 0.51        | 99.39%                |
| Junio                                     | 30          | 24           | 720                      | 5.93                  | 714.07                   | 8                         | 89.26       | 0.74        | 99.18%                |
| Julio                                     | 31          | 24           | 744                      | 3.12                  | 740.88                   | 6                         | 123.48      | 0.52        | 99.58%                |
| Agosto                                    | 31          | 24           | 744                      | 5.27                  | 738.73                   | 5                         | 147.75      | 1.05        | 99.29%                |
| Septiembre                                | 30          | 24           | 720                      | 19.00                 | 701.00                   | 7                         | 100.14      | 2.71        | 97.36%                |
| Octubre                                   | 31          | 24           | 744                      | 5.90                  | 738.10                   | 15                        | 49.21       | 0.39        | 99.21%                |
| Noviembre                                 | 30          | 24           | 720                      | 15.25                 | 704.75                   | 5                         | 140.95      | 3.05        | 97.88%                |
| Diciembre                                 | 31          | 24           | 744                      | 18.58                 | 725.42                   | 1                         | 725.42      | 18.58       | 97.50%                |
| <b>Disponibilidad anual:</b>              |             |              |                          |                       |                          |                           |             |             | <b>98.89%</b>         |

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 50, indica que durante el periodo del año 2017 la central hidroeléctrica tuvo una disponibilidad de generación de 98.89%, esto quiere decir que presentó un 1.11% de indisponibilidad por problemas técnicos en el equipo.

## V. METODOLOGÍA

El desarrollo de la investigación tiene enfoque de tipo descriptivo para los dos equipos más importantes de la central hidroeléctrica y sus componentes auxiliares. Las variables estudiadas fueron las fallas recurrentes tomadas de los históricos de disparos, sus causas y frecuencias y la disponibilidad técnica durante el periodo del año 2017.

Las fuentes utilizadas para la recopilación de información, se basaron en la inspección de los manuales de los fabricantes y fichas técnicas, se realiza un análisis de falla con el fin de describir sus motivos, causas y su frecuencia de activación durante el periodo estudiado. Se realizaron diagramas de causa y efecto para cada uno de los equipos, tomando en cuenta las fallas posibles y las obtenidas del historial de disparos.

Se obtuvo información de los operadores de la central hidroeléctrica, asimismo de documentos y textos que abarcan el tema de mantenimiento. Se realizó una medición inicial, determinando el valor de la disponibilidad técnica por mes y el anual, utilizando indicadores, con base al histórico de disparos.

Este proceso se divide en 4 fases metodológicas:

En la fase inicial, capítulo A, B y C, se describe la importancia de aplicar un mantenimiento preventivo en una empresa, se realizó una descripción de las generalidades de la central hidroeléctrica, los equipos y sus componentes.

En la segunda fase, capítulo D, E, F y G, se identificó cada una de las fallas y problemas que presentan los equipos a investigar y el origen de las mismas, para establecer un régimen de falla mediante la realización de un análisis, se identificaron los equipos, se estableció el tipo de mantenimiento que se utiliza en la gestión y se describe la secuencia de pasos para solicitar la programación del mantenimiento al mercado mayorista.

La tercera fase, capítulo H, I, J, K y L, consistió en describir una serie de actividades por equipo, proponiendo un cronograma con las tareas a realizar mediante una calendarización de mantenimiento, tomando en cuenta actividades de inspección, sustitución de repuestos y lubricación. La realización de un análisis explicando las medidas de seguridad y protecciones para el personal encargado de ejecutar los trabajos y la identificación de herramientas y repuestos.

En la cuarta y última fase, capítulo M y N, se describe una serie de instrucciones de mantenimiento y se determinan los indicadores basados en la disponibilidad para poder hacer seguimiento al desempeño de la gestión del mantenimiento, siendo estos indicadores, tiempo medio entre fallas, tiempo medio para la reparación y disponibilidad técnica.

## VI. RESULTADOS

### A. Presentación de formatos para la guía de mantenimiento:

Mediante la investigación se diseñan cuatro formatos individuales para cada uno de los equipos tomados en cuenta en esta investigación.

1. Se realizaron cuatro formatos de plan seguro de trabajo, identificando 10 riesgos potenciales en el sistema de la turbina, 10 en la válvula principal de entrada, 10 en la unidad de presión hidráulica y 11 en la máquina sincrónica, que se pueden presentar en el proceso de las actividades de reparación y mantenimiento.
2. Se realizaron cuatro cronogramas de actividades divididos por sistemas y componentes auxiliares, estos contienen tareas de mantenimiento que se deberán de realizar según su calendarización propuesta.
3. Se realizó un formato estándar de orden de trabajo de mantenimiento que el técnico debe de llenar después de realizar un trabajo correctivo o preventivo.
4. Se realizaron cuatro formatos especificando los repuestos correspondientes a cada equipo.

### B. Presentación de cantidad de actividades de mantenimiento:

Con base al resultado del cronograma de actividades que especifican las tareas programadas de mantenimiento, se realizó una serie de instrucciones para cada equipo, dando de resultado las cantidades siguientes de actividades propuestas por maquinaria:

Tabla 51. Identificación de la cantidad de actividades de mantenimiento de la turbina Pelton.

| Descripción de actividades. | Cantidad. | Descripción de procedimiento.  |
|-----------------------------|-----------|--|
| Actividades de limpieza.    | 2.        | Control de limpieza del rodete.<br>Control de limpieza de cámara de descarga.  |
| Actividades de inspección.  | 6.        | Inspección visual del caracol.<br>Inspección con líquidos penetrantes en rodete.<br>Inspección visual a punta de agujas.<br>Inspección visual en asientos y dispositivos del deflector.<br>Inspección de desgaste en inyectores.<br>Inspección visual en cámara de descarga. |
| Actividades de calibración. | 2.        | Calibración de carrera de agujas.<br>Calibración de carrera de deflectores.  |
| Actividades de lubricación. | 1.        | Lubricación del vástago de guía del cilindro deflector.  |

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 51, se determina la cantidad de actividades propuestas de mantenimiento, correspondientes a la turbina Pelton, acordes a trabajos de limpieza, inspección, calibración y lubricación de componentes.

Tabla 52. Identificación de la cantidad de actividades de mantenimiento de la válvula principal de entrada.

| <b>Descripción de actividades.</b> | <b>Cantidad.</b> | <b>Descripción de procedimiento.</b>  |
|------------------------------------|------------------|---|
| Actividades de limpieza.           | <b>5.</b>        | Control de limpieza del cuerpo.<br>Control de limpieza del cilindro actuador.<br>Control de limpieza del cilindro actuador.<br>Control de limpieza del contrapeso.<br>Control de limpieza de tubería de derivación.<br>Control de limpieza de caja de conexiones. |
| Actividades de inspección.         | <b>6.</b>        | Inspección visual del cuerpo de la carcasa.<br>Inspección visual del disco.<br>Inspección visual del cilindro actuador.<br>Inspección visual de mangueras y acoples.<br>Inspección visual del sistema contrapeso.<br>Inspección de tubería de derivación.         |
| Actividades de lubricación.        | <b>2.</b>        | Lubricación a zonas expuestas a desgastes.<br>Lubricación de bola de cilindro actuador.   |

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 52, se determina la cantidad de actividades propuestas de mantenimiento, correspondientes a la válvula principal de entrada, acordes a trabajos de limpieza, inspección y lubricación de componentes.

Tabla 53. Identificación de la cantidad de actividades de mantenimiento de la unidad de presión hidráulica (HPU).

| Descripción de actividades. | Cantidad. | Descripción de procedimiento.   |
|-----------------------------|-----------|---|
| Actividades de limpieza.    | 6.        | Control de limpieza del tanque y carcasa.<br>Limpieza de dispositivos de filtración.<br>Control de limpieza de bomba de engranajes.<br>Control de limpieza de motores de la bomba.<br>Limpieza, bloque múltiple de electroválvulas.<br>Limpieza de sistema eléctrico. |
| Actividades de inspección.  | 5.        | Inspección visual de tanque hidráulico.<br>Inspección visual de bomba de engranajes.<br>Inspección visual de motores de la bomba.<br>Inspección de bloque de electroválvulas.<br>Inspección de tuberías rígidas de distribución.                                      |
| Actividades de lubricación. | 1.        | Nivelación o cambio de lubricante en tanque.  |
| Actividades de sustitución. | 4.        | Cambio de cojinetes del motor de bomba.<br>Cambio de elemento de filtración de presión.<br>Cambio de filtro de línea de retorno.<br>Cambio de filtro de ventilación del tanque.   |
| Actividades de medición.    | 1.        | Medición de resistencia de aislamiento.   |

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 53, se determina la cantidad de actividades propuestas de mantenimiento, correspondientes a la unidad de presión hidráulica (HPU), acordes a trabajos de limpieza, inspección, lubricación, sustitución y medición de componentes.

Tabla 54. Identificación de la cantidad de actividades de mantenimiento de la Máquina Sincrónica (Generador y Excitatriz).

| Descripción de actividades. | Cantidad. | Descripción de procedimiento.  |
|-----------------------------|-----------|--|
| Actividades de limpieza.    | 4.        | Control de limpieza del estator.<br>Control de limpieza del rotor.<br>Control de limpieza de la excitatriz.<br>Limpieza de caja de conexiones. |
| Actividades de inspección.  | 5.        | Inspección visual del estator.<br>Inspección de desgaste del eje del rotor.<br>Inspección de bobinas.<br>Inspección de ruido y vibraciones.    |
| Actividades de lubricación. | 2.        | Lubricación de cojinete superior.<br>Lubricación de cojinete inferior.   |
| Actividades de sustitución. | 1.        | Cambio de pastillas de freno.  |
| Actividades de medición.    | 3.        | Medición de varistores.<br>Medición de diodos.<br>Medición de resistencia de aislamiento.  |

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 54, se determina la cantidad de actividades propuestas de mantenimiento, correspondientes a la máquina sincrónica y excitatriz, acordes a trabajos de limpieza, inspección, lubricación, sustitución y medición de componentes.

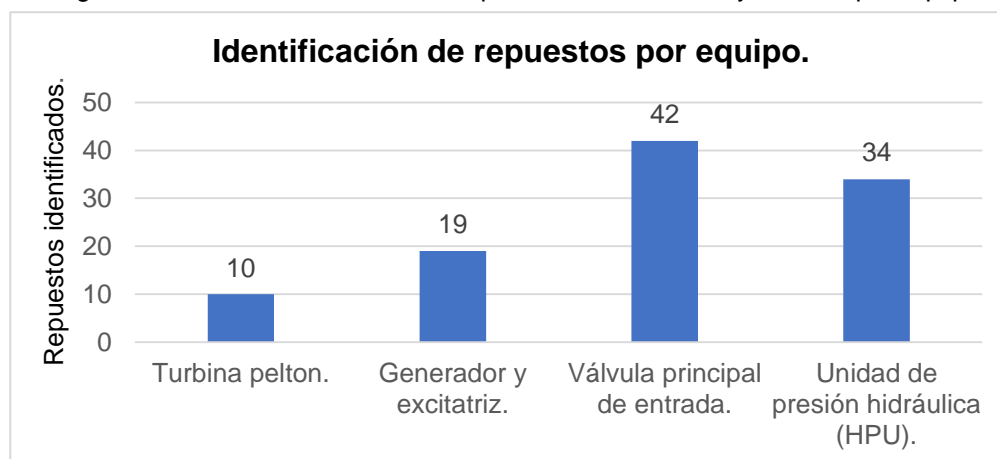
### C. Presentación de indicadores:

Se evaluaron datos históricos de fallas, durante el periodo de un año, con el fin de dar un diagnóstico inicial, se determinaron tres indicadores de gestión para calcular la disponibilidad técnica durante el periodo estudiado, siendo este resultado la disponibilidad anual de generación durante el año del 2017. Se obtuvo durante el año estudiado una pérdida en el indicador de disponibilidad técnica por problemas causados en los equipos.

## VII. ANÁLISIS DE RESULTADOS

- A. Los cuatro formatos que se realizaron del plan de trabajo seguro, sirven de guía para que el colaborador realice las actividades de manera eficiente y segura, evitando accidentes durante las distintas etapas del mantenimiento (antes, durante y después).
  
- B. Los cuatro cronogramas de actividades realizados para cada uno de los equipos servirán de guía para el técnico y la administración encargada del área de mantenimiento, de esta manera se logrará llevar un seguimiento a detalle de las funciones y tareas que se llevarán a cabo en el tiempo estipulado, ya sea en la realización de tareas de prevención y reparación. Se lograron identificar 17 actividades de limpieza, 22 de inspección, 6 de calibración y testeo, 6 de lubricación y 5 de sustitución, este es en total por los 4 equipos que se tomaron en cuenta, además de procedimientos especiales correspondientes a cada maquinaria. Estableciendo plazos de tiempo en los cronogramas de mantenimiento, implica que los colaboradores se esmeren en cumplir las tareas asignadas, dando resultado la realización de un buen mantenimiento y por ende el equipo se mantendrá en óptimas condiciones, disminuyendo paradas imprevistas y salidas de línea durante la generación.
  
- C. Se realizó un formato de orden de trabajo de mantenimiento, para que el área administrativa y el técnico lleve un mejor control de las actividades realizadas ya sean correctivas o preventivas, estipuladas en el cronograma de actividades de cada equipo. Esta herramienta recopilará los datos, permitiendo tener organizadas y llevar un historial de todas las tareas realizadas, en cuestión de tiempos, repuestos, herramientas y materiales.
  
- D. Los cuatro listados de repuestos clasificados por sistemas servirán de guía para actuar más rápido ante algún fallo o eventualidad, se logrará identificar de manera más rápida las piezas y componentes que se van a reemplazar o reparar y se podrá realizar los pedidos correctos sin cometer errores. Este listado especifica la cantidad, descripción, referencia (número de serie o medidas) y la marca o proveedor de las piezas mecánicas, eléctricas y sus respectivos consumibles (filtros y lubricantes). Mediante el siguiente gráfico (ver Figura 38), se determina la cantidad de repuestos identificados y listados por equipo.

Figura 38. Gráfica de cantidad de repuestos identificados y listados por equipo.



Fuente: Elaboración propia.

- E. Para poder ejecutar con mayor eficiencia las tareas de mantenimiento programadas en el cronograma de actividades, se realiza una serie de instrucciones asociadas a cada equipo. Esto servirá de guía para el técnico, explica la manera correcta de la realización del trabajo, especificando procedimientos de limpieza, inspección, lubricación, calibración, testeo y sustitución de repuestos, según sea el caso. La cuantificación de instrucciones realizadas se describe en la Tabla 55.

Tabla 55. Cantidad de intrucciones de mantenimiento realizadas por equipo.

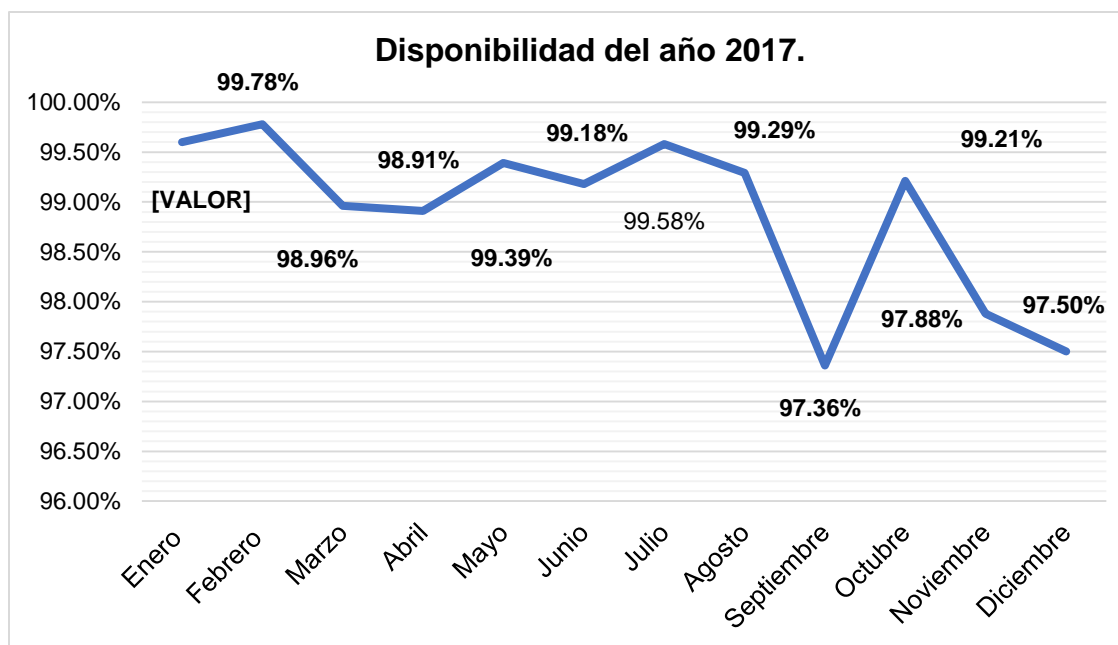
| Equipo.                       | Instructivo.       | Cantidad. | Descripción.   |
|-------------------------------|--------------------|-----------|--|
| Turbina Pelton.               | Limpieza.          | 1.        | General.   |
|                               | Inspección.        | 1.        | Líquidos penetrantes.                                    |
|                               | Calibración.       | 2.        | Carrera de agujas y posición de deflectores.             |
| Válvula principal de entrada. | Limpieza.          | 1         | Limpieza general.  |
|                               | Lubricación.       | 2         | Zonas expuestas a desgastes y bola de cilindro actuador. |
|                               | Especial.          | 1         | Purga de circuito oleo hidráulico.                       |
| Unidad de presión hidráulica. | Limpieza.          | 3         | General, motor asíncrono y bomba.                        |
|                               | Lubricación.       | 2         | Tanque hidráulico y cojinetes de motor.                  |
|                               | Sustitución.       | 4         | Cojinetes del motor y elementos filtrantes.              |
|                               | Medición y testeo. | 1         | Medición de resistencia de aislamiento.                  |
| Máquina sincrónica.           | Limpieza.          | 1.        | General.   |
|                               | Lubricación.       | 2.        | Cojinete superior e inferior.                            |
|                               | Medición y testeo. | 3.        | Test de diodos, varistores y resistencia de aislamiento. |
|                               | Sustitución.       | 1.        | Sustitución de pastillas de freno.                       |

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 55, anteriormente descrita define la cuantificación de los instructivos realizados en esta guía de mantenimiento, contabilizando las mismas, da un resultado de 25 instrucciones asociadas a los 4 equipos que servirán para realizar el trabajo de manera correcta.

F. Mediante el siguiente análisis gráfico, se logró mostrar la variación de disponibilidad técnica que hubo durante cada mes, en el periodo del año 2017. Tomando en cuenta los datos obtenidos en la Tabla 50, a continuación, se presenta la gráfica de disponibilidad promedio en la central hidroeléctrica.

Figura 39. Curva de disponibilidad promedio de cada mes durante el año 2017 en la central hidroeléctrica.



Fuente: Elaboración propia.

La Figura 39, indica el índice de variación de disponibilidad durante cada mes, promediando durante el año una disponibilidad de 98.89%, para conocer la indisponibilidad que se presenta en los mismos, por los disparos y fallas ocurridas durante el periodo del año estudiado, se realiza la siguiente tabla.

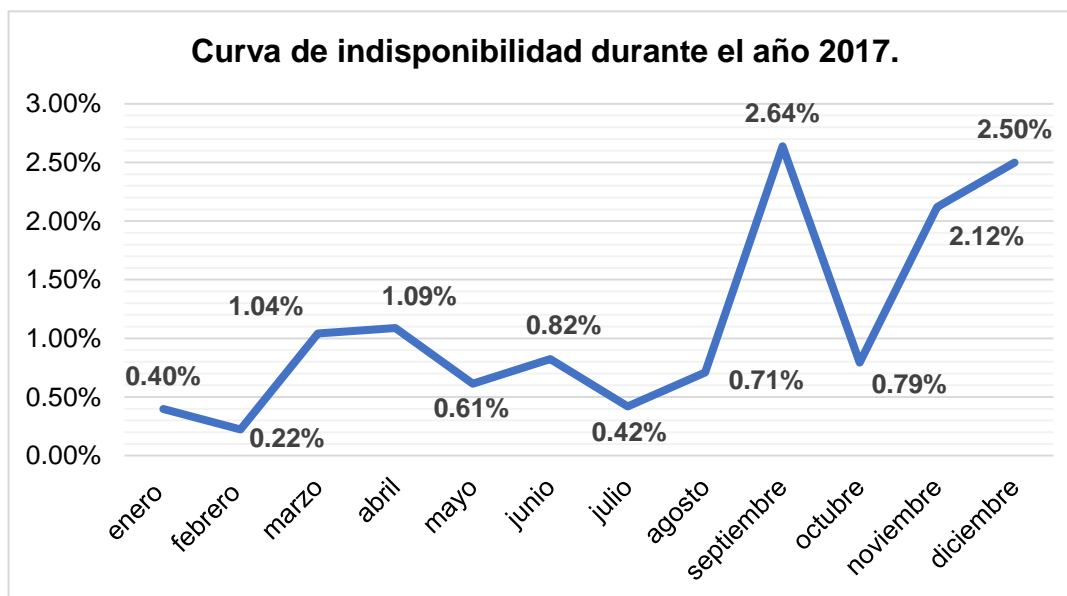
Tabla 56. Índice de indisponibilidad de cada mes, durante el periodo del 2017.

| Mes.        | Disponibilidad. | Indisponibilidad. |
|-------------|-----------------|-------------------|
| Enero.      | 99.60%          | 0.40%             |
| Febrero.    | 99.78%          | 0.22%             |
| Marzo.      | 98.96%          | 1.04%             |
| Abril.      | 98.91%          | 1.09%             |
| Mayo.       | 99.39%          | 0.61%             |
| Junio.      | 99.18%          | 0.82%             |
| Julio.      | 99.58%          | 0.42%             |
| Agosto.     | 99.29%          | 0.71%             |
| Septiembre. | 97.36%          | 2.64%             |
| Octubre.    | 99.21%          | 0.79%             |
| Noviembre.  | 97.88%          | 2.12%             |
| Diciembre.  | 97.50%          | 2.50%             |

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 56, indica el índice de indisponibilidad que tuvo la central hidroeléctrica durante los meses del año 2017, promediando estos valores da un total de 1.11%, esta fue la indisponibilidad que se vio afectada por los problemas que ocasionaron disparos y salidas de línea durante el año estudiado, afectado la generación de energía eléctrica.

Figura 40. Curva de Indisponibilidad promedio de cada mes durante el año 2017 en la central hidroeléctrica.



Fuente: Elaboración propia.

Se observa en la curva de indisponibilidad un aumento en los últimos meses del año, esto debido a que en la temporada invernal los problemas y fallas pasan con mayor frecuencia, por disturbios en la red eléctrica debido a tormentas o por averías en los equipos internos.

## VIII. CONCLUSIONES

- A.** Mediante la realización del análisis de falla, se identificó 89 disparos que provocaron salidas forzadas de línea durante el periodo de 12 meses del año 2017. Determinando los fallos funcionales y técnicos causados por problemas externos debido a tormentas electro atmosféricas e internos por fallas eléctricas y mecánicas en los equipos, se logró realizar las distintas actividades que conforman este modelo de mantenimiento.
- B.** Para garantizar la seguridad de los encargados del mantenimiento, se desarrolló un plan de actividad seguro de trabajo por equipo, identificando los riesgos potenciales, elementos de protección y medidas de seguridad. Se identificó 41 riesgos potenciales, que se pueden presentar durante las tres etapas (antes, durante y después), que conforman el proceso de mantenimiento.
- C.** Para asegurar la efectividad y el control de la gestión del mantenimiento, se implementó un sistema de medición, utilizando indicadores enfocados en la disponibilidad, siendo estos, tiempo medios entre fallas (MTBF), tiempo medio de reparación (MTTF) y disponibilidad técnica, se evaluó los datos del historial de fallas del año 2017, durante este período la central hidroeléctrica tuvo una disponibilidad de generación de 98.89%, esto quiere decir que presentó un 1.11% de indisponibilidad por problemas técnicos en los equipos.
- D.** La guía de mantenimiento basada en la recopilación de datos del historial de fallas se efectuó tomando como muestra el año 2017, se estableció un análisis estadístico en base a la aplicación de tres indicadores de gestión, la sistematización se enfocó en optimizar el funcionamiento de los equipos, realizando actividades calendarizadas de sustitución, inspección y limpieza sistematizada, en el período semanal, mensual, mayo, agosto y octubre. Obteniendo 96 avisos de mantenimiento de manera automática, que permite tener un mejor control y una mejor organización en la gestión.

## IX. RECOMENDACIONES

Si en un futuro la central hidroeléctrica a la que se le realiza el estudio desea implementar esta guía de mantenimiento, es necesario que sigan las siguientes recomendaciones:

- A.** Es indispensable llenar el formato de orden de trabajo de las actividades realizadas de cada mantenimiento y acción correctiva, para llevar un control y un historial en forma física de todas las fallas que se presentan en los distintos equipos y sistemas.
- B.** Capacitar a los técnicos sobre el plan seguro de trabajo que se implementará, darles a conocer los peligros y los modos más eficientes de abordarlos. Es de suma importancia implicar a los colaboradores en la formación y familiarizarlos con los procedimientos establecidos, de esta manera ellos garantizarán su seguridad.
- C.** Para determinar el uso óptimo de los indicadores de gestión es necesario que la disponibilidad brindada al sistema nacional interconectado sea mayor a 98.89%, esto demostrará que se tuvo una mejora con la aplicación de todas estas actividades.
- D.** Dar seguimiento a la gestión de mantenimiento en su desarrollo, aplicando los indicadores de mantenimiento propuestos en esta investigación, en periodos determinados, de esta manera se logrará llevar un mejor control de la disponibilidad de generación.

Entre otras recomendaciones están las siguientes:

- E.** Llevar a cabo todas las actividades de mantenimiento propuestas en la guía, las ejecuciones de estas garantizarán que los equipos se mantengan en óptimas condiciones, funcionando de manera continua.
- F.** Mantener en *stock* los repuestos o piezas de reposición necesarias, separadas por equipo, para poder cubrir cualquier eventualidad que se presente, ya sea de manera emergente o de prevención.

## X. BIBLIOGRAFÍA

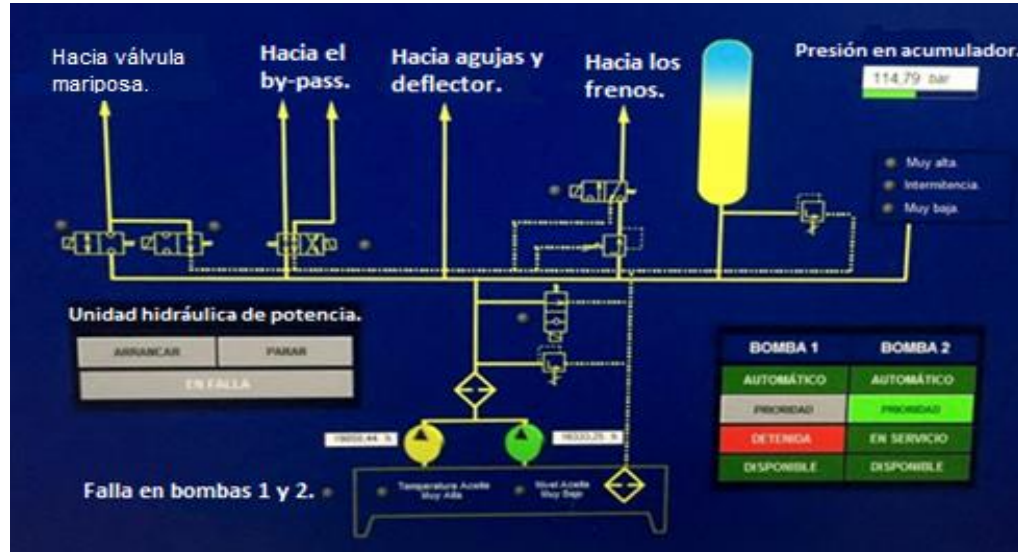
- Administrador de mercado mayorista. 2001. *Norma de coordinación comercial, NCC-01*. Guatemala: págs. 2-6.
- Andritz Hydro. 2013. «Válvula de mariposa.». *Manual de operación*. Francia: D2fc energy valves. 19 págs.
- Central hidroeléctrica. «Diseño estructural de la casa de máquinas.». *Plano dimensional de la casa de máquinas*. Guatemala: Proyecto hidroeléctrico. 2 págs.
- Central hidroeléctrica. *Histórico de disparos y fallas*. Guatemala: Proyecto hidroeléctrico.
- Central hidroeléctrica. *Manual de operación volumen 1*. Guatemala: Proyecto hidroeléctrico. 20 págs.
- Central hidroeléctrica. *Manual de Planos dimensionales de la maquinaria y obras estructurales*. Guatemala: Proyecto hidroeléctrico. 38 págs.
- Central hidroeléctrica. *Planilla de datos del generador*. Guatemala: Proyecto hidroeléctrico. 1 págs.
- Central hidroeléctrica. *Planilla de datos de la turbina*. Guatemala: Proyecto hidroeléctrico. 1 págs.
- Central hidroeléctrica. *Planilla de datos de la unidad de presión hidráulica*. Guatemala: Proyecto hidroeléctrico. 1 págs.
- Central hidroeléctrica. *Planilla de datos de la válvula principal de entrada*. Guatemala: Proyecto hidroeléctrico. 1 págs.
- Comisión venezolana de normas industriales, 2001. *Mantenimiento definiciones*. Caracas: Fondorma. 17 págs.
- Cuartas, Luis. 2008. *¿Qué es el mantenimiento?* Medellín: Documento preparado por IM. págs. 1-5.
- Díez, Pedro. 2009. «Turbina Pelton». *Turbinas hidráulicas*. España: Caminos de la universidad de Cantabria. págs. 35-38.
- Donate, Antonio. 1999. «Cap. 4: Inducción electromagnética.». *Principios de electricidad y electrónica II*. Barcelona: Marcombo. págs. 73-80.

- Empresa provincial de energía de Córdoba, Epec. 2013. *La tecnología hidroeléctrica. Córdoba*. Epec. págs. 18.
- Equipamientos eléctricos Weg S.A. 2014. *Manual de instalación, operación y mantenimiento del hidrogenerador*. Brasil: Grupo Weg. 47 págs.
- García, Garrido. *Fórmulas de cálculo de indicadores de disponibilidad*. <http://www.reporteroindustrial.com/blogs/Formulas-de-calculo-de-indicadores-de-disponibilidad+115450>. [junio 2018].
- García, Oliverio. 2006. «Elementos constitutivos del TPM.». *El mantenimiento productivo total y su aplicabilidad industrial*. Colombia: Universidad pedagógica de Colombia. págs.6-7.
- García, Santiago. 2012. «Cap. 1: Los objetivos del mantenimiento.». *Manual práctico para la gestión eficaz del mantenimiento industrial*. España: Renovetec. págs. 1-10.
- Muñoz, María. 2007. *Mantenimiento industrial. Madrid*. págs. 5-7.
- Nava, José Domingo. 2001. *Teoría del mantenimiento*. 2da edición. Mérida: consejo de publicaciones de la universidad de Los Andes. 114 págs.
- Newbrough, E.T. 1998. «Primera parte: Organización del mantenimiento.». *Administración de mantenimiento industrial*. México: Diana. págs. 23-70.
- Ortega, Ernesto; Verona, Erick 2004. *Implementación de indicadores de mantenimiento en el taller industrial Adife*. Tesis Universidad tecnológica de Bolívar. Colombia: Facultad de ingeniería mecánica. 104 págs.

## XI. ANEXOS

### A. Esquema de la unidad de presión hidráulica (HPU).

Figura 41. Esquema de funcionamiento de la unidad de presión hidráulica (HPU).



Fuente: Imagen captada en panel de control de la unidad de presión hidráulica (HPU).

La Figura 41, muestra el esquema de funcionamiento de la unidad de presión hidráulica, indica mediante un diagrama los componentes que son accionados por el aceite distribuido del HPU.

### B. Cambio de lubricante del cojinete de aceite del generador.

Existen intervalos que describen a cada cuanto tiempo se debe de realizar el cambio de aceite en el cojinete superior del generador, según su temperatura de trabajo. Estos intervalos son propuestos por el fabricante, manual del hidrogenerador (2014:34):

Tabla 57. Intervalos de lubricación del cojinete superior del generador, según la temperatura del aceite.

| Intervalos de lubricación según su temperatura. |                        |
|---|------------------------|
| Temperatura.                                    | Tiempo de lubricación. |
| < 75°C.   | 20,000 horas.          |
| Entre 75°C y 80°C.                              | 16,000 horas.          |
| Entre 80°C y 85°C.                              | 12,000 horas.          |
| Entre 85°C y 90°C.                              | 8,000 horas.           |
| Entre 90°C y 95°C.                              | 6,000 horas.           |
| Entre 95°C y 100°C.                             | 4,000 horas.           |

Fuente: Weg, manual del hidrogenerador, (2014:34).

**C. Factor de corrección para los intervalos de lubricación del rodamiento inferior a grasa.**

Según el manual del hidrogenerador (2014:35), los factores de corrección que hay que aplicar para los intervalos de lubricación del rodamiento inferior a grasa basados en los rangos de temperatura son los siguientes:

Tabla 58. Factores de corrección para los intervalos de lubricación del cojinete a grasa del generador.

| <b>Intervalos de lubricación según su temperatura.</b> |                              |
|--|------------------------------|
| <b>Temperatura.</b>                                    | <b>Factor de corrección.</b> |
| < 60°C.  | 1.59                         |
| Entre 70°C a 80°C.                                     | 0.63.                        |
| Entre 80°C y 90°C.                                     | 0.40.                        |
| Entre 90°C y 100°C.                                    | 0.25                         |
| Entre 100°C y 110°C.                                   | 0.16                         |

Fuente: Weg, manual del hidrogenerador, (2014:35).

#### D. Matriz de coherencia.

Tabla 59. Matriz de coherencia utilizada mediante la investigación.

| Preguntas orientadoras.  | Objetivo.   | Conclusión.   | Recomendación.   |
|--|---|---|--|
| ¿Según qué, se realizará la guía de mantenimiento preventiva?  | Desarrollar un análisis de falla, para determinar la causa de un defecto o problema, mediante la recopilación de datos del historial de los equipos.  | Mediante el desarrollo del análisis de falla, se identificó 89 disparos que provocaron salidas forzadas de línea durante el periodo de 12 meses del año 2017. Determinando los fallos funcionales y técnicos se logró realizar las distintas actividades que conforman este modelo de mantenimiento.  | Es indispensable llenar el formato de orden de trabajo de las actividades realizadas de cada mantenimiento y acción correctiva, para llevar un control y un historial en forma física de todas las fallas que se presentan en los distintos equipos y sistemas.  |
| ¿Cómo se logrará minimizar y garantizar la seguridad del personal, durante la realización de los trabajos de mantenimiento y reparación? | Desarrollar un análisis de seguridad en el trabajo, identificando los peligros relacionados en cada etapa, desarrollando soluciones que minimicen el riesgo y garanticen la seguridad física de los responsables de la realización del mantenimiento. | Para garantizar la seguridad de los encargados del mantenimiento, se desarrolló un plan de actividad seguro de trabajo, identificando los riesgos potenciales, elementos de protección y medidas de seguridad. Se identificó 41 riesgos potenciales, que se presentan durante las tres etapas que conforman el proceso de mantenimiento, siendo estas, antes durante y después. | Capacitar a los técnicos sobre el plan seguro de trabajo que se implementará, darles a conocer los peligros y los modos más eficientes de abordarlos. Es de suma importancia implicar a los colaboradores en la formación y familiarizarlos con los procedimientos establecidos, de esta manera ellos garantizarán su seguridad. |

| Preguntas orientadoras.   | Objetivo.  | Conclusión.   | Recomendación.   |
|---|--|---|--|
| <p>¿En función de qué, se debe de medir y controlar la gestión del mantenimiento?</p> | <p>Implementar un sistema de medición del mantenimiento, utilizando indicadores de gestión enfocados en la disponibilidad, para asegurar la efectividad y control del mantenimiento propuesto.</p> | <p>Para asegurar la efectividad y el control de la gestión del mantenimiento, se propuso implementar un sistema de medición, utilizando indicadores enfocados en la disponibilidad, siendo estos, tiempos medios entre fallas (MTBF), tiempo medio de reparación (MTTF) y disponibilidad técnica, se evaluaron los datos del historial de fallas del año 2017, durante este período la central hidroeléctrica tuvo una disponibilidad de generación de 98.89%, esto quiere decir que presentó un 1.11% de indisponibilidad por problemas técnicos en el equipo.</p> | <p>Para determinar el uso óptimo de los indicadores de gestión es necesario que la disponibilidad brindada al sistema nacional interconectado sea mayor a 98.89%, esto demostrará que se tuvo una mejora con la aplicación de todas estas actividades.</p> |

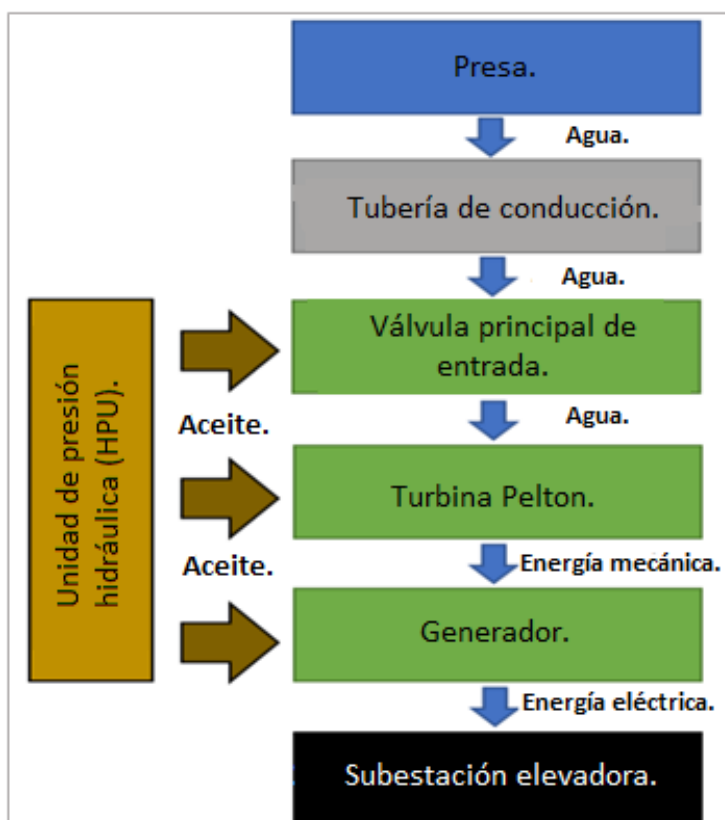
| <b>Preguntas orientadoras.</b>                                | <b>Objetivo.</b>  | <b>Conclusión.</b>   | <b>Recomendación.</b>  |
|---|---|--|--|
| ¿En qué se basará la realización del modelo de mantenimiento? | Diseñar una guía de mantenimiento preventivo para la Turbina y Generador, en una central hidroeléctrica, basada en la recopilación de datos del historial de fallas, que optimice el funcionamiento de los equipos y aumente el índice de disponibilidad en la inyección de energía al sistema nacional interconectado. | La guía de mantenimiento basada en la recopilación de datos del historial de fallas se efectuó tomando como muestra el año 2017, se estableció un análisis estadístico según la aplicación de los tres indicadores de gestión, la sistematización se enfocó en optimizar el funcionamiento de los equipos, realizando actividades de trabajo de sustitución, inspección y limpieza sistematizada, en el período semanal, mensual, mayo, agosto y octubre. Obteniendo 96 avisos de mantenimiento de manera automática, que permite tener un mejor control y una mejor organización en la gestión. | Dar seguimiento a la gestión de mantenimiento en su desarrollo, aplicando los indicadores de mantenimiento propuestos en esta investigación, en periodos determinados, de esta manera se logrará llevar un mejor control de la disponibilidad de generación. |

Fuente: Elaboración propia.

La matriz de coherencia descrita en la Tabla 59, indica la relación que tienen entre sí, las preguntas orientadoras, los objetivos, conclusiones y recomendaciones, utilizadas en el desarrollo de esta investigación.

## E. Proceso de generación de energía en central hidroeléctrica.

Figura 42. Proceso de generación de energía en central hidroeléctrica.



Fuente: Elaboración propia.

La Figura 42, indica de manera resumida el proceso de generación de energía eléctrica de la central hídrica a la que se le realiza la investigación, desde la captación del agua en la presa hasta la subestación elevadora que es la encargada de transformar la energía y enviarla al sistema nacional interconectado.

**F. Formato de ficha para muestra de aceite.**

Figura 43. Formato de ficha para muestreo de aceite en los equipos.

| <b>Ficha técnica para muestreo de aceite:</b> |                             |
|---|-----------------------------|
| Nombre del aceite:                            | <input type="text"/>        |
| Viscosidad (Según ficha técnica.):            | <input type="text"/>        |
| Fabricante del lubricante:                    | <input type="text"/>        |
| Marca del equipo:                             | <input type="text"/>        |
| Tiempo de arranque del equipo:                | <input type="text"/> Horas. |
| Tiempo de uso del aceite:                     | <input type="text"/> Horas. |
| Fecha de muestreo:                            | <input type="text"/>        |

Fuente: Elaboración propia.

## XII. GLOSARIO.

|                             |  |
|-----------------------------|--|
| <b>Recurso renovable:</b>   | Recurso natural que se puede restaurar por procesos naturales a una velocidad superior a la del consumo de los seres humanos.  |
| <b>Energía renovable:</b>   | Energía que se obtiene de fuentes naturales inagotables, ya sea por la inmensa cantidad de energía que contienen o porque son capaces de regenerarse por medios naturales.   |
| <b>Tubería forzada:</b>     | Es la tubería que lleva el agua a presión desde el canal o embalse hasta la entrada de la válvula principal.   |
| <b>Golpe de ariete:</b>     | Aumento violento de la presión en una conducción hidráulica producido por el cierre brusco de una válvula.   |
| <b>Cangilón:</b>            | Elemento mecánico de acero inoxidable con forma de cuchara o pala, que forma parte del rodete de la turbina. Su función es recibir la energía cinética que trae el agua haciendo girar de este modo el rodete.   |
| <b>Frecuencia:</b>          | Es una magnitud que mide el número de repeticiones por unidad de tiempo de cualquier fenómeno o suceso periódico.  |
| <b>Potencia:</b>            | Es un parámetro que indica la cantidad de energía eléctrica transferida de una fuente generadora a un elemento consumidor por unidad de tiempo.  |
| <b>Tensión nominal:</b>     | Es la potencia máxima que demanda una máquina o aparato en condiciones de uso normales.  |
| <b>Excitatriz auxiliar:</b> | Es un generador trifásico de imanes permanentes en el rotor, proporciona suficiente potencia para alimentar el campo.  |
| <b>Regulador voltaje:</b>   | Dispositivo que tiene la finalidad de mantener el voltaje constante, independiente de carga.   |
| <b>AMM:</b>                 | Administrador de mercado mayorista, es una entidad privada, sin fines de lucro cuyas funciones son las de coordinar la operación de centrales generadoras, interconexiones y líneas de transportes, establecer precios de mercado a corto plazo para la transferencia de potencia y energía, garantizando la seguridad y el abastecimiento de la energía eléctrica en el país. |

- Cadena de cierre:** Disparo de cierre de emergencia que acciona una cadena de suspensión automática en la operación, dejando fuera de línea la central y cerrando la válvula principal de entrada.
- Proceso VPI:** Proceso de impregnación por presión de vacío, consiste en someter el motor a un proceso de vacío en seco durante unas horas para eliminar el aire y la humedad, luego se repite el proceso con resina epoxy de manera que todos los espacios se mantengan llenos, penetrando en los aislamientos.
- Megóhmetro:** Instrumento utilizado para medir el aislamiento eléctrico en alta tensión.
- Resistencia aislante:** Voltaje máximo al que puede exponerse un material sin provocarle perforación o daño alguno, resistencia eléctrica entre el circuito interno y un punto de masa de la célula.
- Disponibilidad:** Medida que indica cuanto tiempo está disponible un equipo o sistema operativo. Refiriéndose a la unidad generadora, es el tiempo real en que la unidad aporta potencia al sistema nacional interconectado, medible a través de los tiempos perdidos y salidas forzadas.