



**UNIVERSIDAD
DEL AZUAY**

**DEPARTAMENTO DE POSTGRADOS
MAESTRÍA EN GESTIÓN DE MANTENIMIENTO VERSIÓN 3**

Optimización del plan de mantenimiento e inventario de repuestos del área mecánica en la central hidroeléctrica Alazán, basado en el análisis de criticidad y mantenimiento centrado en confiabilidad

Trabajo de graduación previo a la obtención del título de
Magíster en Gestión de Mantenimiento

Autor: Ing. Hugo Alfredo Dután Amay

Director: Ing. Carlos Urgilés

Cuenca – Ecuador

2021

Optimización del plan de mantenimiento e inventario de repuestos del área mecánica en la central hidroeléctrica Alazán, basado en el análisis de criticidad y mantenimiento centrado en confiabilidad

Dután Amay Hugo Alfredo

hdutanamay@gmail.com

Resumen - Mediante el presente trabajo se realiza la optimización del mantenimiento mecánico para la central hidroeléctrica Alazán. El estudio engloba el análisis de la situación actual del área de mantenimiento mecánico y el desarrollo de un plan basado en la técnica de análisis de criticidad y mantenimiento centrado en confiabilidad RCM.

La parte central se compone del desarrollo del plan de mantenimiento para los equipos mecánicos partiendo del análisis de criticidad de activos, así como de los modos y efectos de fallo.

Parte integrante del presente estudio constituye la determinación del stock óptimo de repuestos que se deben disponer en la central, basado en la metodología RCS (repuestos centrados en confiabilidad) en base a los resultados obtenidos del análisis RCM.

Los resultados obtenidos, permiten establecer la optimización del plan de mantenimiento de equipos mecánicos y los repuestos asociados.

Índice de Términos – criticidad, confiabilidad, mantenimiento, repuestos.

Abstract - Through this work, the optimization of mechanical maintenance for the Alazán hydroelectric plant was carried out. The study includes the analysis of the current situation in the mechanical maintenance area and the development of a plan based on the technique of criticality analysis and maintenance focused on reliability RCM.

The main objective consists of the development of the maintenance plan for mechanical equipment based on the criticality analysis of assets, as well as the means and effects of failure.

An integral part of this study is the determination of the optimal stock of spare parts that should be available in the plant, based on the RCS methodology (spare parts focused on reliability) based on the results obtained from the RCM analysis.

The results obtained allow to establish the optimization of the maintenance plan for mechanical equipment and associated spare parts.

Keywords - criticality, reliability, maintenance, spare parts.

Translated by:



Hugo Alfredo Dután Amay

I. INTRODUCCIÓN

La central Hidroeléctrica Alazán cuenta con una unidad de eje horizontal y potencia nominal de 6,23 MW. Se encuentra declarada en operación comercial desde las 00:00 horas del 18 de octubre de 2017, registrando una operación de 26838 horas y un aporte de 90249 MWh al SNI con corte al 31 de diciembre de 2019.

Las características técnicas de la central hidroeléctrica Alazán se muestran en la TABLA I.

Durante el tiempo transcurrido de operación se han ejecutado mantenimientos preventivos y correctivos, basados en las recomendaciones dadas por el fabricante de los equipos y corrigiendo los fallos que se presentaron durante su operación.

Uno de los parámetros que se maneja en el análisis del cumplimiento de las metas operativas es el número de salidas forzadas por mantenimiento correctivo no programado MCNP. Para el caso de la central Alazán, se registraron los siguientes datos:

- Año 2017: 15 salidas forzadas
- Año 2018: 26 salidas forzadas
- Año 2019: 20 salidas forzadas

TABLA I
CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LA CENTRAL ALAZÁN

Caudal de diseño	Aprovechamiento Alazán: 3,44 m ³ /s del río Mazar y 0,16 m ³ /s de la quebrada Sipanche. Total: 3,6 m ³ /s
Potencia Nominal	6,23 MW
Energía media anual	39,05 GWh
Factor de planta de diseño	72%
Tipo de turbina	Tipo Pelton de eje horizontal con dos inyectores, 300rpm
Generador	6922.2KVA/6230KW – 6600V
Sistemas auxiliares	Válvula Esférica DN900, Regulador de Velocidad Digital, Sistema de Lubricación, Sistema de Agua de enfriamiento, Puente Grúa 50/10 toneladas.
Sistema de transmisión	S/E Alazán – S/E Colectora (doble circuito): 10.40 km, 26 torres
	S/E Colectora – S/E Azogues 2 (doble circuito): 23.60 km, 81 torres
Sistema de control y comunicaciones	Sistema de supervisión, control y adquisición de datos SCADA sobre parámetros hidráulicos, electromecánicos, eléctricos y el despacho de carga.

El registro de metas operativas de la central durante la etapa de operación comercial y las proyectadas para el período 2020 se indica en la TABLA II.

TABLA II
CONFIABILIDAD Y DISPONIBILIDAD DE LA CENTRAL ALAZÁN

AÑO	CONFIABILIDAD		DISPONIBILIDAD	
	Planificada	Alcanzada	Planificada	Alcanzada
2018	99,60%	82,59%	96,16%	79,35%
2019	83,97%	93,46%	87,72%	82,30%
2020	87,66%	-	79,22%	-

Con el fin de alcanzar los índices operativos acorde a la planificación y gestionar de manera técnica y eficiente el mantenimiento de los activos, se determinó la necesidad de optimizar el plan de mantenimiento que actualmente se ejecuta, así como encontrar el inventario de repuestos mecánicos óptimo para los equipos críticos.

II. OBJETIVOS

A. Objetivo General

Mejorar la disponibilidad de la central de generación mediante la optimización del plan de mantenimiento del área mecánica y definición del stock óptimo de repuestos a través de la implementación de metodologías aplicada a nivel mundial: criticidad de equipos y mantenimiento centrado en confiabilidad.

B. Objetivos Específicos

- Analizar la situación actual del plan de mantenimiento de la central hidroeléctrica Alazán.
- Jerarquizar la estructura de objetos mecánicos con base al análisis de criticidad.
- Desarrollar el plan de mantenimiento mecánico para la central hidroeléctrica Alazán, aplicando la técnica de criticidad y RCM.
- Determinar el stock óptimo de repuestos que se deben disponer en la central, sobre la base de los resultados de la aplicación del análisis de criticidad y RCM.

III. PROPUESTA METODOLÓGICA

A. Situación Actual

Para ejecutar el análisis técnico de la situación actual de la gestión de mantenimiento mecánico que se ejecuta en la central hidroeléctrica Alazán, se realizó el análisis utilizando el modelo de auditorías de mantenimiento propuesto por RENOVETEC [1].

Se seleccionó este modelo debido a que engloba aspectos como mantenimiento preventivo y plan de mantenimiento, mantenimiento correctivo, stock de repuestos; que son temas en relación directa con los objetivos del presente trabajo.

La evaluación se basa en la respuesta a un cuestionario de 102 preguntas que evalúan aspectos como:

- Personal de mantenimiento
- Medios técnicos empleados por mantenimiento
- Mantenimiento preventivo y plan de mantenimiento
- Organización del mantenimiento correctivo
- Sistema de información
- Stock de repuestos

Para el análisis propuesto, sobre la base de juicios expertos, se conformó un equipo técnico integrado por los siguientes profesionales:

- Jefe de Central – Ingeniero Eléctrico
- Especialista Técnico Mecánico – Ingeniero Mecánico
- Operador – Ingeniero Mecánico
- Mecánico – Ingeniero Mecánico

Los resultados obtenidos de la evaluación realizada se indican en la TABLA III.

TABLA III
RESULTADOS OBTENIDOS DE LA EVALUACIÓN REALIZADA

PARÁMETRO	PUNTAJE MÁXIMO	PUNTAJE OBTENIDO	INDICE DE CONFORMIDAD
1. Personal de mantenimiento	78	47	60%
2. Medios técnicos empleados por mantenimiento	39	26	67%
3. Mantenimiento preventivo y plan de mantenimiento	21	10	48%
4. Organización del mantenimiento correctivo	51	23	45%
5. Sistema de información	36	10	28%
6. Stock de repuestos	36	9	25%
7. Análisis de resultados de mantenimiento	45	30	67%
TOTAL	306	155	51%

La figura 1 muestra los índices de conformidad por cada aspecto evaluado para el área mecánica.

El balance global de la gestión de mantenimiento mecánico para la central hidroeléctrica Alazán alcanza un valor del 51% de cumplimiento, resultado de dividir el puntaje obtenido con el puntaje máximo.

Para los fines del presente estudio se estableció que los aspectos que presentan un índice de conformidad inferior al 60% (sistema mejorable) deben ser analizados para su tratamiento de manera prioritaria. En concordancia con el alcance y objetivos propuestos, los aspectos que se van a tratar se relacionan con el mantenimiento preventivo y plan de mantenimiento, organización del mantenimiento correctivo y stock de repuestos.

El aspecto relacionado con el Sistema de Información no se lo abordó debido a que no se tiene implementado un software para la gestión del mantenimiento

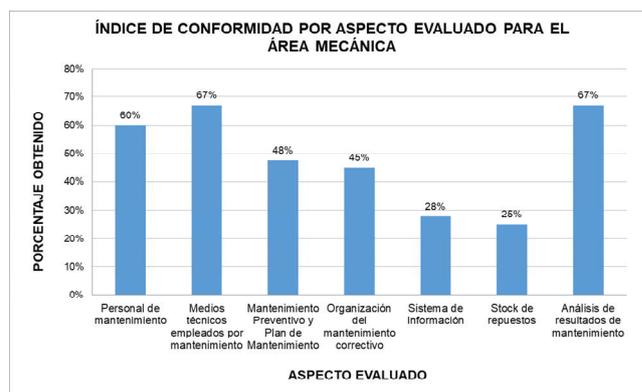


Fig. 1. Índices de Conformidad por aspecto evaluado para la situación actual de la gestión de mantenimiento mecánico que se ejecuta en la central hidroeléctrica Alazán.

B. Metodología a aplicar

Para el desarrollo del presente trabajo se consideraron las siguientes etapas secuenciales a ser ejecutadas:

- Levantamiento de la Estructura de objetos de la planta
- Análisis de criticidad
- Aplicación de la metodología RCM / definición de actividades de mantenimiento.
- Levantamiento del stock óptimo de repuestos, aplicación de la metodología RCS.

IV. APLICACIÓN

A. Estructura de objetos

Para establecer la estructura de objetos de la central hidroeléctrica Alazán, se consideran los siguientes aspectos:

- La Corporación Eléctrica del Ecuador tiene definido el modelo de codificación de los activos para sus centrales de generación y sistema de transmisión, establecido por el Comité Asesor Interno (CAI) de CELEC Matriz, basado en la norma ISO 14224:2016 [2]
- Los activos a ser considerados dentro de este análisis corresponden a los equipos principales y auxiliares que se encuentran en Casa de Máquinas.

Dentro de la corporación se encuentran establecidos diez niveles para la estructura de objetos de sus centrales de generación. El detalle se muestra en la TABLA IV.

TABLA IV
NIVELES ESTABLECIDOS POR EL COMITÉ ASESOR
INTERNO CAI DE CELEC MATRIZ PARA LA ESTRUCTURA
DE OBJETOS DE SUS CENTRALES DE GENERACIÓN

NIVEL	DESCRIPCIÓN
1	Corporación
2	Unidad de Negocio
3	Zona
4	Actividad
5	Instalación
6	Infraestructura
7	Sistema
8	Subsistema
9	Equipo
10	Componente

En el caso de la central hidroeléctrica Alazán, los seis primeros niveles se definieron según lo indicado en la TABLA V.

TABLA V
NIVEL 1 AL 6 DEFINIDO PARA LA CENTRAL
HIDROELÉCTRICA ALAZÁN

NIVEL	DESCRIPCIÓN	CÓDIGO
1	CORPORACIÓN ELÉCTRICA DEL ECUADOR	CELEC
2	HIDROAZOGUES	HAZ
3	CAÑAR	CAN
4	CENTRAL DE GENERACIÓN HIDRÁULICA	CGH
5	ALAZÁN	ALZ
6	PLANTA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA 01	PGEE01

Del nivel 7 al 10, la estructura de objetos mecánicos para la central hidroeléctrica Alazán contemplan la siguiente clasificación jerárquica:

Nivel 7:

- Unidad de Generación Hidráulica
- Agua de Enfriamiento
- Aire Comprimido
- Contraincendios
- Drenaje y desagüe
- Izaje y Transporte

Nivel 8:

- Generador Eléctrico
- Levantamiento Grupo Rotativo
- Línea de Agua contraincendios
- Línea de Agua de Enfriamiento Casa de Máquinas
- Línea de aire comprimido de servicios
- Línea de desagüe Casa de Máquinas
- Puente Grúa
- Regulador de Velocidad
- Turbina Hidráulica
- Válvula Principal

Nivel 9: se registran 23 equipos asociados a los subsistemas del nivel 8.

Nivel 10: se registran 121 componentes asociados con los equipos del nivel 9

B. Análisis de criticidad

La evaluación del riesgo permite optimizar las acciones a implementar dentro de un programa de mantenimiento poniendo mayor atención a aquellos elementos (sistemas o equipos) que presentan un riesgo alto y disminuyendo las acciones y recursos para los elementos que presentan un riesgo bajo.

Como resultado del análisis de criticidad se obtienen los siguientes insumos:

- Lista jerarquizada por criticidad de los sistemas y/o equipos de la planta.
- Matriz de criticidad con la calificación del riesgo para cada sistema y/o equipo de la planta.

Una de las metodologías de análisis y evaluación del riesgo de mayor uso en el campo industrial es la propuesta por William T. Fine [12]. Este método de análisis de criticidad propuesto se basa en la siguiente relación:

$$Riesgo = Ocurrencia \cdot Exposición \cdot Consecuencias \quad (1)$$

La probabilidad de falla es el producto de la ocurrencia por la exposición.

Para el caso de la probabilidad de falla, se definieron los rangos mostrados en la TABLA VI.

TABLA VI
RANGOS DEFINIDOS PARA LA OCURRENCIA Y EXPOSICIÓN,
MÉTODO W. T. FINE

PROBABILIDAD				
OCURRENCIA			EXPOSICIÓN	
Probable	30 DÍAS \geq MTBF 12 ó más fallas por año	10	20 – 24 h	10
Ocasional	90 \geq MTBF > 30 DÍAS de 4 a 11 fallas por año	8	15 – 20 h	8
Rara	180 \geq MTBF > 90 DÍAS de 2 a 3 fallas por año	5	10 – 15 h	6
Remota	360 > MTBF \geq 180 DÍAS 1 falla por año	3	5 – 10 h	4
Mínima	MTBF > 360 DÍAS menos de una falla por año	1	<5h	2

La ocurrencia y exposición se valoran con un máximo de 10, con lo que la máxima probabilidad alcanza el valor del 100%, con un valor ponderado de 100.

Para las consecuencias se definieron los siguientes aspectos:

- Seguridad y Salud
- Medio Ambiente
- Costos de Mantenimiento
- Pérdida de Producción

Se realizaron las siguientes consideraciones para la asignación de los rangos en los aspectos antes indicados:

- Los impactos relacionados a la seguridad y salud y al medio ambiente se consideran de mayor criticidad que

los impactos relacionados con los costos de mantenimiento y pérdida de producción.

- Los impactos relacionados con la pérdida de producción se consideran de mayor criticidad que los relacionados a los costos de mantenimiento.
- La sumatoria de las ponderaciones de las consecuencias tendrá un resultado máximo de 100.

Para el caso de las consecuencias, se definieron los rangos mostrados en la TABLA VII.

TABLA VII
RANGOS DEFINIDOS PARA LAS CONSECUENCIAS, MÉTODO W. T. FINE

CONSECUENCIAS							
SEGURIDAD Y SALUD		MEDIO AMBIENTE		PÉRDIDA DE PRODUCCIÓN		COSTO DE MTO.	
Muerte	30	Daño irreversible al ambiente y que violan leyes ambientales	30	80% < PDE ≤ 100%	25	mayor a \$ 7.001	15
Accidente con pérdida de tiempo	15	Daño irreversible al ambiente pero no violan leyes ambientales	15	60% < PDE ≤ 80%	12	\$ 5.001 - \$ 7.000	8
Lesión sin pérdida de tiempo	8	Daño ambiental reversible o mitigable	8	40% < PDE ≤ 60%	6	\$ 1.001 - \$ 5.000	4
Incidente	4	Mínimo daño al ambiente	4	20% < PDE ≤ 40%	3	\$ 500 - \$ 1.000	2
Condición subestándar	2	Sin daños ambientales	2	0% ≤ PDE ≤ 20%	2	menor a \$ 500	1

La matriz para la evaluación de la criticidad quedó establecida según lo indicado en la TABLA VIII.

La clasificación para los subsistemas a ser analizados se definió de la siguiente manera:

1. Crítico: criticidad > 1000
2. Importante: 100 < criticidad ≤ 1000
3. Normal: criticidad ≤ 100

TABLA VIII
MATRIZ ESTABLECIDA PARA EVALUACIÓN DE CRITICIDAD, MÉTODO W. TL FINE

PROBABILIDAD				CONSECUENCIAS								
OCURRENCIA		EXPOSICIÓN		SEGURIDAD Y SALUD	MEDIO AMBIENTE	PÉRDIDA DE PRODUCCIÓN	COSTO DE MANTENIMIENTO					
Probable	30 DÍAS ≥ MTBF 12 o más fallas por año	10	20 – 24 h	10	Muerte	30	Daño irreversible al ambiente y que violan leyes ambientales	30	80% < PDE ≤ 100%	25	mayor a \$ 7.001	15
Ocasional	90 ≥ MTBF > 30 DÍAS de 4 a 11 fallas por año	8	15 – 20 h	8	Accidente con pérdida de tiempo	15	Daño irreversible al ambiente pero no violan leyes ambientales	15	60% < PDE ≤ 80%	12	\$ 5.001 - \$ 7.000	8
Rara	180 ≥ MTBF > 90 DÍAS de 2 a 3 fallas por año	5	10 – 15 h	6	Lesión sin pérdida de tiempo	8	Daño ambiental reversible o mitigable	8	40% < PDE ≤ 60%	6	\$ 1.001 - \$ 5.000	4
Remota	360 > MTBF ≥ 180 DÍAS 1 falla por año	3	5 – 10 h	4	Incidente	4	Mínimo daño al ambiente	4	20% < PDE ≤ 40%	3	\$ 500 - \$ 1.000	2
Mínima	MTBF > 360 DÍAS menos de una falla por año	1	< 5h	2	Condición subestándar	2	Sin daños ambientales	2	0% ≤ PDE ≤ 20%	2	menor a \$ 500	1

El análisis de criticidad aplicado a la central hidroeléctrica Alazán, se realizó con las siguientes consideraciones:

- Se aplica el análisis a los subsistemas de Casa de Máquinas.
- La información de la ocurrencia de fallos se obtuvo de las bitácoras de operación e informes mensuales y anuales de operación.
- El periodo de evaluación comprende los años 2017, 2018 y 2019.
- Para el caso de las consecuencias, la asignación del puntaje es el resultado, de la evaluación y análisis, sobre la base de juicio de expertos, del equipo técnico conformado.

TABLA IX
DATOS DE FALLOS Y TIEMPOS POR FALLO OBTENIDOS

SUBSISTEMA	PROMEDIO FALLOS (fallos/año)	TIEMPO PROMEDIO POR FALLO (horas)
Línea de agua de enfriamiento Casa de Máquinas	2	5,74
Línea de aire comprimido servicios	0	0
Línea de desagüe Casa de Máquinas	0	0
Generador Eléctrico 01	2	2,89
Levantamiento de grupo rotativo	5	13,66
Regulador de Velocidad	10	6,52
Válvula Principal	1	32,25
Turbina Hidráulica	1	97,27
Línea de Agua contra incendios de Casa de Máquinas	0	0
Puente Grúa de Casa de Máquinas	0	0

Para establecer la tasa de fallos y el tiempo promedio por fallo se consideró el año que se tienen los mayores tiempos de indisponibilidad por subsistema. Se consideran solamente los fallos catalogados como Mantenimiento Correctivo No Programado - MCNP. Los resultados obtenidos se muestran en la TABLA IX.

Los índices de criticidad obtenidos del análisis ejecutado se indican en la TABLA X.

TABLA X
RESULTADOS OBTENIDOS DEL ANÁLISIS DE CRITICIDAD

SUBSISTEMA	ÍNDICE DE CRITICIDAD	CRITICIDAD
Generador Eléctrico 01	5000	Crítico
Regulador de Velocidad	3888	Crítico
Turbina Hidráulica	3000	Crítico
Válvula Principal	3000	Crítico
Levantamiento de grupo rotativo	2640	Crítico
Línea de agua de enfriamiento Casa de Máquinas	540	Importante
Puente Grúa de Casa de Máquinas	110	Importante
Línea de Agua contra incendios de Casa de Máquinas	98	Normal
Línea de aire comprimido servicios	32	Normal
Línea de desagüe Casa de Máquinas	14	Normal

En base a la clasificación de los subsistemas por su criticidad en la planta, se definió la aplicación de las técnicas de mantenimiento según se indica en la TABLA XI.

TABLA XI
TÉCNICAS A SER APLICADAS PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL PLAN DE MANTENIMIENTO

SUBSISTEMA	CRITICIDAD	TÉCNICA DE MANTENIMIENTO A APLICAR
Generador Eléctrico 01	Crítico	Mantenimiento Centrado en Confiabilidad RCM
Regulador de Velocidad	Crítico	
Turbina Hidráulica	Crítico	
Válvula Principal	Crítico	
Levantamiento de grupo rotativo	Crítico	
Línea de agua de enfriamiento Casa de Máquinas	Importante	Mantenimiento predictivo y preventivo
Puente Grúa de Casa de Máquinas	Importante	
Línea de Agua contra incendios de Casa de Máquinas	Normal	
Línea de aire comprimido servicios	Normal	
Línea de desagüe Casa de Máquinas	Normal	
	Normal	

C. Análisis RCM

Una vez que se identificaron los activos/sistemas críticos, se define aplicar a este grupo el análisis RCM.

El RCM es una metodología que trabaja el mantenimiento a nivel de modos de fallos y consecuencias con el fin de determinar los requerimientos de mantenimiento de los activos físicos, es decir, identificar cuándo y cómo se debe realizar el mantenimiento en un equipo o sistema.

El diagrama de implementación del análisis se indica en la figura 2.

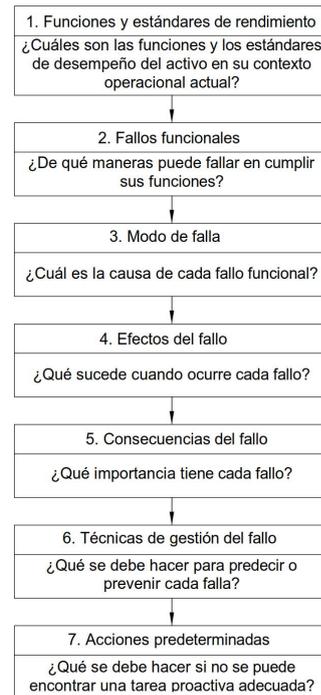


Fig. 2. Diagrama para implementación de la metodología RCM

Para la implementación del análisis RCM, se desarrolló la matriz indicada en la Tabla XII en la que se evalúan las 6 primeras preguntas básicas.

TABLA XII
MATRIZ DE EVALUACIÓN PARA ANÁLISIS RCM

SUBSISTEMA	EQUIPO	1	2	3	4	5	6			
		FUNCIÓN + CONTEXTO	FALLO FUNCIONAL	MODO DE FALLA	EFECTOS DEL FALLO	CONSECUENCIAS DEL FALLO	MONITOREO DE CONDICIÓN (implican el empleo de equipo especializado)		TAREAS PREDICTIVAS - PREVENTIVAS	
							ACTIVIDAD	FRECUENCIA		ACTIVIDAD

Para la definición de las actividades de la pregunta 6, se consideraron los siguientes tipos de tareas:

- **Tareas Proactivas:** se enfocan en prevenir el fallo, es decir, se ejecutan antes de que éste ocurra. Estas tareas se enmarcan dentro de lo que se conoce como mantenimiento preventivo y predictivo.
- **Acciones Alternativas:** corresponden al estado de fallo propiamente y se ejecutan cuando no es posible identificar una tarea proactiva efectiva.

Dentro de las tareas proactivas se tiene la siguiente clasificación

- Restauración Programada
- Sustitución Programada
- Monitoreo de condición

La restauración programada y la sustitución programada se enmarcan directamente dentro del mantenimiento preventivo, mientras que el monitoreo de condición está enmarcado dentro de las técnicas predictivas. Las Técnicas Predictivas tienen las siguientes categorías [3]

- Técnicas de monitoreo de la condición que implican el empleo de equipos especializado.
 - Monitoreo de efectos dinámicos.
 - Monitoreo de presencia de partículas.
 - Monitoreo de efectos químicos
 - Monitoreo de efectos físicos
 - Monitoreo de la temperatura
 - Monitoreo de propiedades eléctricas
- Técnicas basadas en las variaciones de la calidad del producto.
- Técnicas de monitoreo de parámetros de funcionamiento.
- Técnicas de inspección basadas en los sentidos.

Las acciones alternativas se clasifican en las siguientes categorías:

- Búsqueda de fallos
- Rediseño
- Trabajo hasta el fallo

D. Inventario de repuestos

Desde la óptica del RCM, la única razón válida para mantener stocks de piezas de repuesto es evitar o reducir las consecuencias de un fallo.

El implementar un plan de mantenimiento basado en la confiabilidad, permite determinar las actividades específicas a ejecutar, tanto predictivas, preventivas o correctivas. Para complementar estas actividades se requieren los repuestos asociados a los modos de fallos encontrados.

La metodología RCS (repuestos centrados en confiabilidad), que se deriva directamente del RCM, permite determinar el stock adecuado de repuestos asociados a cada modo de fallo identificado en el análisis RCM. Esta metodología de gestión de repuestos no se basa en juicios subjetivos de área de mantenimiento ni en lo indicado por el fabricante del equipo, sino en el análisis sistemático del faltante, es decir, qué pasa si un repuesto no está disponible cuando se requiere.

Es importante indicar que en el sector de la producción de energía los costos de los activos son altos y las paradas de producción implican altas pérdidas económicas por cada día de no generación. De igual manera los tiempos para

ejecutar reparaciones sobre los equipos, debido a su tamaño y complejidad, son altos por lo que el tener un inventario de repuestos óptimo ligado a un adecuado plan de mantenimiento permitirá tener un balance entre costo y eficiencia, evitando paradas prolongadas no programadas para reparaciones complejas.

Mediante la aplicación de la metodología RCS, el inventario de repuestos críticos está basado en los requerimientos de mantenimiento y operación, optimizando la inversión y garantizando el control de las consecuencias de seguridad y salud, medio ambiente, pérdida de producción, costos de mantenimiento; asociadas a los modos de fallos.

Entre las principales ventajas de la aplicación de RCS, se tienen:

- Reducción del inventario de repuestos mecánicos.
- Mayor disponibilidad de equipos mecánicos.
- Mayor disponibilidad de la planta.
- Optimización de costos de repuestos mecánicos, obtenidos en base a una metodología sistemática.

Para la determinación del listado de repuestos mecánicos óptimos para la central Alazán, se consideraron los requerimientos de mantenimiento y operación para el equipo o sistema crítico, tomando en cuenta como insumo los modos de fallo determinados en el análisis RCM.

V. RESULTADOS

El procedimiento de determinación de la estructura de objetos mecánicos y la aplicación del análisis de criticidad permitió identificar los subsistemas mecánicos críticos de la central hidroeléctrica Alazán, los cuales se presentan en la Tabla X.

Mediante la metodología propuesta se ejecutó el análisis RCM de los subsistemas críticos, obteniendo los modos, efectos y consecuencias de fallo. A partir de esta determinación se establecieron las actividades de mantenimiento a ser implementadas y su periodicidad de ejecución.

Se implementó la metodología RCM para los cinco subsistemas críticos identificados, según se indica en la TABLA XI.

Para los sistemas con criticidad Importante y Normal, se levantaron tareas de mantenimiento basadas en las recomendaciones del fabricante y en la experiencia del personal de mantenimiento de la central.

La metodología RCS, considerando los modos de falla, se aplicó a los subsistemas críticos identificados en la TABLA XI.

En la TABLA XIII se presenta la metodología implementada para la determinación del stock de repuestos, tomando como ejemplo el subsistema crítico Turbina Hidráulica.

En la TABLA XIV se presenta, como ejemplo, el análisis RCM realizado para el Regulador de Velocidad.

Para los sistemas con criticidad Importante y Normal, el stock de repuestos requeridos se determinó considerando que se deberá aplicar una Restauración Programada o una Sustitución Programada en componentes de estos sistemas.

Este criterio es aplicable debido a que la tasa de fallos de estos sistemas es baja y a que los costos de tener un componente completo no son altos en comparación con sistemas de criticidad alta

El costo que implica la adquisición de los repuestos mecánicos determinados asciende al valor de \$ 62.309,24 dólares sin considerar el impuesto al valor agregado. Se realizan las siguientes puntualizaciones:

- Existen repuestos que fueron dejados por el fabricante de los equipos como parte de los repuestos recomendados para intervención en mantenimientos mayores y su costo no se considera debido a que no representaría inversión para el plan de mantenimiento.

TABLA XIII
LEVANTAMIENTO DE REPUESTOS MECANICOS PARA LA
TURBINA HIDRÁULICA

SUBSISTEMA	EQUIPO	MODO DE FALLA	REPUESTO REQUERIDO	CANT.	UNID.
Turbina Hidráulica	Turbina	Desgaste en las cucharas del rodete	Rodete NOTA: La adquisición de un rodete nuevo deberá estar basada en el análisis de datos de desgaste del rodete. No constituye un repuesto emergente.	1	u
		Desgaste de las agujas del inyector	Juego de agujas de los inyectores (2 inyectores)	1	juego
		Desgaste de los asientos del inyector	Juego de asientos de los inyectores (2 inyectores)	1	juego
		Desgaste del sello laberinto del eje	Sellos del eje de la unidad en la turbina	1	u
		Sellos del pistón del deflector desgastados	Juego de sellos del pistón hidráulico del deflector	1	juego
	Contra_chorro	Desgaste de la válvula motorizada	Válvula motorizada (incluye válvula y actuador)	1	u
	Tuberías, válvulas y accesorios	Cañerías rotas	Juego de acoples de las cañerías del inyector	1	juego

- Los costos se obtuvieron de procesos de compras ejecutados, así como de la estimación realizada con los fabricantes de los equipos.

VI. CONCLUSIONES

- El actual plan de mantenimiento considera la ejecución de actividades basadas en el cumplimiento del número de horas de funcionamiento y en las recomendaciones dadas por los fabricantes de los equipos, sin hacer un análisis de priorización e importancia de los activos y sin tener como objetivo fundamental la funcionalidad de los mismos.
- La metodología empleada para evaluar la situación actual de la gestión de mantenimiento mecánico que se ejecuta en la central hidroeléctrica Alazán permitió establecer los aspectos que se deben trabajar para mejorar la gestión de mantenimiento mecánico.
- Al inicio de la ejecución del presente trabajo no se tenía definida la estructura de objetos jerárquica y sistemática. La aplicación de la estructura de objetos para los sistemas y equipos de la central Alazán permitió tener una visión ordenada, clara y precisa de los activos con los que se cuenta en la central y proponer un adecuado plan de mantenimiento.
- El análisis de criticidad ejecutado determinó los activos bajo un orden priorizado para el proceso de gestión de mantenimiento mecánico y su correspondiente priorización: crítico, importante y normal.
- La implementación de la metodología RCM para los subsistemas críticos mecánicos permitió determinar sus modos de fallo y determinar las actividades necesarias para tener bajo control los potenciales daños a los activos.
- El plan de mantenimiento obtenido establece las tareas mecánicas fundamentales que se deben ejecutar sobre los diferentes sistemas mecánicos críticos, indicando su periodicidad y descripción general de las actividades, con el fin de conseguir una mejora en los índices de gestión operativa de la central.
- El inventario de repuestos determinado mediante la metodología RCS, complementa los resultados obtenidos mediante la aplicación de la metodología RCM y propende a disminuir los tiempos de indisponibilidad.
- A través de la implementación de la metodología RCS se apunta a optimizar el inventario de repuestos mecánicos y por ende los costos asociados.

VII. RECOMENDACIONES

- El desarrollo de la metodología RCM requiere la conformación de un equipo de trabajo con técnicos que tengan el conocimiento del contexto operativo de la instalación, por tanto, se debe establecer de manera

TABLA XIV
ANÁLISIS RCM PARA EL REGULADOR DE VELOCIDAD

SUBSISTEMA	EQUIPO	1	2	3	4	5	6			
		FUNCIÓN + CONTEXTO	FALLO FUNCIONAL	MODO DE FALLA	EFFECTOS DEL FALLO	CONSECUENCIAS DEL FALLO	MONITOREO DE CONDICIÓN (implican el empleo de equipo especializado)		TAREAS PREDICTIVAS - PREVENTIVAS	
							ACTIVIDAD	FRECUENCIA	ACTIVIDAD	FRECUENCIA
Regulador de Velocidad	Acumulador de presión	Almacenar fluido hidráulico presurizado	No almacena fluido presurizado	Membrana del tanque acumulador rota	Pérdida de presión del sistema	Indisponibilidad del sistema			Monitoreo de parámetros de funcionamiento.	Mensual
				Válvula de carga del acumulador desgastada	Pérdida de presión del acumulador	Indisponibilidad del sistema			Prueba de presión.	Anual
									Inspección	Mensual
	Unidad oleohidráulica	Mantener la presión hidráulica del sistema entre 3.5 y 4 MPa.	La presión del fluido esta fuera del rango óptimo de funcionamiento	Desgaste de bomba de aceite	No alcanza la presión mínima	Calentamiento motor/bomba Calentamiento del aceite	Ultrasonido	Mensual	Monitoreo de parámetros de funcionamiento.	Mensual
							Análisis de aceite	Semestral	Limpieza	Anual
				Rodamientos del motor desgastados	Altas vibraciones y temperatura	Daño en el motor eléctrico	Termografía	Semestral		
							Análisis de vibraciones	Semestral		
							Ultrasonido	Mensual		
				Rotura del elemento de acople motor-bomba	Desacople entre motor y bomba, no inyecta presión	Daño en el conjunto motor/bomba			Inspección	Anual
				Válvulas hidráulicas desgastadas	Pérdida de presión en el sistema	Indisponibilidad del sistema	Análisis de aceite	Semestral	Limpieza	Anual
									Microfiltrado del aceite	Trimestral
				Motor de paso desajustado	Respuesta errónea de los inyectores	Indisponibilidad del sistema			Verificación de funcionamiento	Semestral
				Nivel de aceite alto/bajo en la cuba	No alcanza la presión mínima	Indisponibilidad del sistema			Inspección	Mensual
				Filtros en la succión tapados	No alcanza la presión mínima	Calentamiento motor/bomba Calentamiento del aceite			Limpieza interna	Anual
				Cañerías rotas	Fuga de aceite, pérdida de presión	Derrame de aceite/ indisponibilidad del sistema			Inspección	Mensual

permanente un equipo de trabajo similar al realizado para el presente estudio.

- Se debe implementar la metodología expuesta en el presente trabajo como modelo de gestión de mantenimiento en el desarrollo de los planes de mantenimiento de las unidades de generación a cargo de la Unidad de Negocio. La secuencia metodológica desarrollada en el presente trabajo debe ser elevada a política de la organización a fin de que esta iniciativa sea considerada dentro de la cultura organizacional.
- Gestionar los recursos necesarios para la implementación del plan de mantenimiento obtenido.
- Definir la periodicidad para la revisión de los instructivos de mantenimiento derivados de la propuesta de plan de gestión de mantenimiento obtenido en el presente trabajo.
- Realizar la revisión periódica del plan de mantenimiento e implementar los ajustes necesarios con el fin de conseguir la mejora de los índices operativos, evidenciados principalmente en la disminución de las salidas forzadas.

VIII. REFERENCIAS

- [1] RENOVETEC (2009). Auditorias de Mantenimiento.
- [2] Norma ISO 14224:2016. Petroleum, petrochemical and natural gas industries — collection and exchange of reliability and maintenance data for equipment
- [3] SEXTO, Luis. (2017). *Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM)*. UDA.
- [4] American Petroleum Institute, API Publication 581. First edition (2000). Risk-Based Inspection Base Resource Document. USA.
- [5] Norma Internacional ISO 14224. Primera edición (1999). Industrias de petróleo y gas natural - Recolección e intercambio de datos de confiabilidad y mantenimiento de equipos.
- [6] SEXTO, Luis. (2015). *Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad – Apuntes y Reflexiones*. Radical Management.
- [7] SAE JA1011 – Evaluation Criteria for Reliability-Centered Maintenance (RCM) Processes
- [8] SAE JA1012 – A Guide to Reliability-Centered Maintenance (RCM)
- [9] Nowlan, F. Stanley, and Howard F. Heap, “Reliability-Centered Maintenance,” Department of Defense, Washington, D.C. 1978. Report Number AD-A066579
- [10] Nowlan, F. Stanley, and Howard F. Heap, “Reliability-Centered Maintenance,” Department of Defense, Washington, D.C. 1978. Report Number AD-A066579
- [11] Corporación Eléctrica del Ecuador CELEC MATRIZ. (2015). Definiciones finales y revisiones del proceso de preimplementación Corporativa FASE 2. Módulo IFS - Mantenimiento - Estructura de Objetos. Cuenca: CELEC Matriz.
- [12] <https://blog.luz.vc/es/como-hacer/el-m%C3%A9todo-de-William-t-fino-aprender-a-hacer-opini%C3%B3n-de-cero-con/>
- [13] <https://cmc-latam.com/analisis-criticidad-semicuantitativa-cuantitativa-activos/>