

Identificación de factores de desgaste en blindajes de turbinas hidroeléctricas y estrategias para aumentar la vida útil en la Pequeña Central Hidroeléctrica Palmas de la ELECTRIFICADORA DE SANTANDER S.A E.S.P.

Santiago Ramírez Jones

Trabajo de Grado para Optar el Título de Ingeniero Mecánico

Director

Francisco José Saldivia Saldivia

Máster en Mantenimiento Industrial

Codirector

Paula Andrea Cuervo Velázquez

Doctora en Ingeniería

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Mecánica

Ingeniería Mecánica

Bucaramanga

2026

Dedicatoria

Dedico este trabajo primero a Dios, por darme la oportunidad de vivir esta maravillosa carrera. A mis padres, José Gregorio Ramírez, Leonor Cristina Jones, y mi Hermana Mariana Ramírez Jones, por ser mi familia, mi apoyo, mi ejemplo, por todos los aprendizajes, por motivarme y ser mi alegría todos los días. A mi pareja Mariana por acompañarme en más de la mitad de mi carrera, por también siempre apoyarme y darme su amor. A todas las personas que en algún momento estuvieron para ayudarme en esta gran experiencia. Y a mi tierra, Bucaramanga, Santander, de la cual me siento muy orgulloso.

Agradecimientos

Agradezco a la Universidad Industrial de Santander por abrirme las puertas, por darme la oportunidad de crecer y madurar como profesional y como persona, a la Escuela de Ingeniería Mecánica, a los profesores que con pasión y paciencia lograron enseñarme tantas cosas, a mis amigos que hicieron de cada clase, espacio, momento, algo muy agradable y que hicieron de esta carrera un lugar feliz.

Agradecer al profesor Francisco José Saldivia por acompañarme en este trabajo de grado, por guiarme y estar comprometido con el proyecto, lo cual fue fundamental para su realización.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	13
1. Objetivos.....	15
1.1 Objetivo General.....	15
1.2 Objetivos Específicos.....	15
2. Marco Teórico.....	16
2.1 Antecedentes.....	16
2.2 Marco Referencial.....	17
2.2.1 Generación hidroeléctrica y Pequeñas Centrales Hidroeléctricas.	18
2.2.2 Turbina hidroeléctrica.....	19
2.2.3 Blindaje de turbina.....	21
2.2.4 Indicadores de Confiabilidad.....	21
2.2.5 Desgaste.....	24
2.2.6 Materiales y criterios de selección para blindajes hidráulicos.....	25
2.2.7 Teorías del mantenimiento.....	26
2.2.8 Mantenimiento centrado en confiabilidad.....	27
2.2.9 Análisis Causa Raíz.....	28
2.2.10 Estrategias de ingeniería para aumentar la vida útil de los blindajes.....	30
2.3 Normas utilizadas.....	30
2.3.1 Norma SAE JA1011 y JA1012.....	31
2.3.2 Norma UNE-EN 62740.....	32
2.3.3 Norma ISO 10816-3 / ISO 20816-5.....	33

3. Metodología	34
3.1 Etapas del desarrollo metodológico	34
3.2.1 Fase de investigación	34
3.2.2 Fase de estudio	35
3.2.3 Fase de Diagnóstico	35
3.2.4 Fase de Análisis Causa Raíz	35
3.2.5 Fase de Recomendaciones	36
4. Diagnóstico PCH Palmas	37
4.1 Contexto operacional	37
4.1.1 Tipo de proceso	37
4.1.2 Redundancia y Disponibilidad	38
4.1.3 Estándares de calidad	39
4.1.4 Estándares de seguridad	39
4.1.5 Estándares ambientales	40
4.1.6 Parámetros operativos	40
4.1.7 Régimen laboral	41
4.1.8 Ubicación de operación	41
4.1.9 Entorno de operación	42
4.1.10 Repuestos y disponibilidad	43
4.1.11 Consecuencias operativas de paradas	43
4.1.12 Demanda del mercado	44
4.1.13 Abastecimiento de materia prima	44
4.2 Caracterización hidrosedimentológica del río Lebrija	45

4.3 Información histórica de mantenimiento y fallas.....	48
4.3.1 Resultados obtenidos	48
4.3.2 Fallas mayores PCH Palmas	50
4.3.3 Estado actual de los blindajes de las turbinas de la PCH Palmas	53
5. Análisis Causa Raíz	56
5.1 Análisis y Reporte de la falla	56
5.2 Evidencias recolectadas	58
5.3 Árbol causal	60
5.3.1 Primera línea de hipótesis	62
5.3.2 Segunda fila de hipótesis	64
5.3.3 Tercera fila de hipótesis	66
5.3.4 Cuarta fila de hipótesis.....	68
5.3.5 Quinta fila de hipótesis	70
6. Recomendaciones propuestas	73
6.1 Aplicación del Algoritmo de Decisión MCC (Norma SAE JA1012).....	73
6.2 Propuesta de alternativas de solución	78
6.3 Comparación técnica de las alternativas de solución.....	79
6.4 Propuestas de mejora al mantenimiento preventivo y predictivo.	81
6.4.1 Seguimiento individual a los blindajes	82
6.4.2 Dar uso predictivo a los datos de vibración, temperatura y velocidad	82
6.4.3 Crear rutinas de mantenimiento predictivo para los blindajes.....	83
6.5 Impacto esperado	84
7. Conclusiones.....	85

Referencias Bibliográficas 88

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. <i>Descripción Turbina Francis</i>	20
Tabla 2. <i>Parámetros de calidad del agua - Río Lebrija</i>	45
Tabla 3. <i>Composición elemental de los sedimentos</i>	46
Tabla 4. <i>Distribución de tamaño de partícula</i>	47
Tabla 5. <i>Resumen últimos 5 años mantenimiento de la PCH Palmas</i>	49
Tabla 6. <i>Resumen fallas mayores últimos 5 años de la PCH Palmas</i>	51
Tabla 7. <i>Evidencias recolectadas</i>	59
Tabla 8. <i>Propiedades de los materiales para los blindajes de las turbinas</i>	80

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. <i>Esquema general del sistema de conducción.</i>	19
Figura 2. <i>Esquema general del piso de turbinas.</i>	20
Figura 3. <i>Algoritmo de decisión Norma SAE JA1012.</i>	31
Figura 4. <i>Esquema de criticidad para vibraciones según norma ISO 10816-3.</i>	33
Figura 5. <i>Disponibilidad Operativa PCH Palmas.</i>	38
Figura 6. <i>Esquema general de la casa de máquinas.</i>	42
Figura 7. <i>Diagrama circular fallas PCH Palmas, sin falla del caracol de la U4.</i>	51
Figura 8. <i>Estado actual de los blindajes de las turbinas.</i>	53
Figura 9. <i>Estado actual de los blindajes de las turbinas.</i>	54
Figura 10. <i>Estado actual de los blindajes de las turbinas.</i>	54
Figura 11. <i>Formato de clasificación del evento.</i>	57
Figura 12. <i>Árbol causal.</i>	61
Figura 13. <i>Primera Línea de Hipótesis</i>	62
Figura 14. <i>Verificación de la primera línea de hipótesis.</i>	63
Figura 15. <i>Segunda línea de hipótesis.</i>	64
Figura 16. <i>Segunda fila de hipótesis.</i>	65
Figura 17. <i>Tercera línea de hipótesis.</i>	66
Figura 18. <i>Tercera fila de hipótesis.</i>	67
Figura 19. <i>Cuarta línea de hipótesis.</i>	68
Figura 20. <i>Cuarta fila de hipótesis.</i>	69
Figura 21. <i>Quinta línea de hipótesis.</i>	70

Figura 22. Quinta línea de hipótesis. 71

Figura 23. *Aplicación del algoritmo de decisión.* 74

Resumen

Título: Identificación de factores de desgaste en blindajes de turbinas hidroeléctricas y estrategias para aumentar la vida útil en la pequeña central hidroeléctrica palmas *

Autor: Santiago Ramírez Jones **

Palabras Clave: Central Hidroeléctrica, Desgaste, Análisis Causa Raíz, Mantenimiento.

Descripción: Este trabajo analiza los mecanismos de desgaste prematuro de los blindajes de las turbinas Francis de la Pequeña Central Hidroeléctrica Palmas, operada por la Electrificadora de Santander, con el propósito de identificar sus causas fundamentales y proponer soluciones técnicas que permitan aumentar su vida útil, confiabilidad y disponibilidad operativa. El estudio se desarrolló a partir de un diagnóstico integral del contexto operacional de la planta bajo los lineamientos de la norma SAE JA1012, incorporando información histórica de operación, mantenimiento, vibraciones, temperaturas y eventos de falla entre 2020 y 2024. Para el análisis del entorno hidráulico, se utilizaron los resultados del estudio de caracterización de sedimentos del río Lebrija suministrado por ESSA, el cual evidenció una alta concentración de sílice, micas y partículas finas de elevada dureza, responsables de un medio altamente erosivo para los componentes hidráulicos. Con base en esta información y en los registros operativos, se aplicó el Análisis de Causa Raíz conforme a la norma UNE-EN 62740, determinando que el deterioro de los blindajes resulta de la interacción entre mecanismos físicos de cavitación y erosión, junto con decisiones históricas de selección de materiales. El algoritmo de decisión del Mantenimiento Centrado en Confiabilidad permitió establecer que el desgaste de los blindajes es un modo de falla determinado por las condiciones sedimentológicas del entorno. Por esta razón, no existen tareas de mantenimiento preventivo basadas en intervalos que permitan evitar su ocurrencia, orientando la solución hacia decisiones de ingeniería como la selección de materiales más resistentes al desgaste y la aplicación de recubrimientos HVOF, complementadas con un esquema de mantenimiento predictivo basado en el seguimiento de espesor, vibración, temperatura y velocidad.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: Francisco José Saldivia Saldivia. Ingeniero Mecánico. MSc. Gerencia de Mantenimiento. Codirector: Paula Andrea Cuervo Velázquez. Ingeniera Mecánica. Doctora en Ingeniería

Abstract

Title: Identification of wear factors in hydroelectric turbine liners and strategies to extend service life at the Palmas small hydroelectric power plant *

Author: Santiago Ramírez Jones¹

Key Words: Hydroelectric Power Plant, Wear, Root Cause Analysis, Maintenance.

Description: This study analyzes the mechanisms of premature wear of the Francis turbine casings at the Palmas Small Hydroelectric Plant, operated by Electrificadora de Santander, with the aim of identifying the root causes and proposing technical solutions to increase their service life, reliability, and operational availability. The study was developed based on a comprehensive diagnosis of the plant's operational context under the guidelines of the SAE JA1012 standard, incorporating historical information on operation, maintenance, vibrations, temperatures, and failure events between 2020 and 2024. To analyze the hydraulic environment, the results of the Lebrija River sediment characterization study provided by ESSA were used, which showed a high concentration of silica, micas, and fine particles of high hardness, responsible for a highly erosive environment for hydraulic components. Based on this information and operational records, Root Cause Analysis was applied in accordance with the UNE-EN 62740 standard, determining that the deterioration of the shielding results from the interaction between physical mechanisms of cavitation and erosion, together with historical material selection decisions. The decision logic of Reliability-Centered Maintenance established that liner wear is a failure mode primarily determined by the sedimentological conditions of the operating environment. For this reason, no time-based preventive maintenance tasks can effectively prevent its occurrence, directing the solution toward engineering decisions such as selecting materials with higher wear resistance and applying HVOF coatings, complemented by a predictive maintenance scheme based on monitoring thickness, vibration, temperature, and rotational speed.

* Degree Work

¹ Faculty of Physical Mechanical Engineering. School of Mechanical Engineering. Mechanical Engineering. Director: Francisco José Saldivia Saldivia Mechanical Engineering. MSc. Maintenance Management. Codirector: Paula Andrea Cuervo Velázquez. Mechanical Engineer. Doctor of Engineering.

Introducción

Las fuentes de energía renovable nacen de la necesidad que existe por cuidar el medio ambiente, entre las cuales se encuentra la energía hidráulica, la cual, según XM¹ representa el 66% de la matriz energética de energías renovables en Colombia. Las pequeñas centrales hidroeléctricas pertenecen a este grupo, y son una parte importante en la generación a nivel regional. Sin embargo, entre los problemas que más surgen en su operación es el desgaste que se pueden generar en sus componentes, y sobre todo en las turbinas. Es por esto por lo que se instalan blindajes, encargados de evitar deterioros directamente en este generador. Aun así, problemas de erosión o cavitación pueden presentarse en estos elementos, los cuales comprometen la eficiencia, incrementan los costos de mantenimiento y reducen la vida útil de los diferentes componentes de la máquina.

En la pequeña central hidroeléctrica Palmas, la cual se aprovecha de las aguas del río Lebrija y es operada por la Electrificadora de Santander, se ha generado una degradación de los blindajes de las turbinas, lo que ha generado costos elevados. Este desgaste puede tener diferentes causas, ya sean propias del diseño de la máquina, o debido a factores externos a esta. Analizando estas causas, se pueden tomar medidas de solución con el fin de solucionar este problema, y la PCH pueda mejorar su funcionamiento.

¹ XM. En el primer semestre del 2024, con el ingreso de 40 proyectos nuevos, se fortalece la seguridad del Sistema Interconectado Nacional. [En línea] (Recuperado en 24 febrero 2025). Disponible en: <https://www.xm.com.co/noticias/7028-en-el-primer-semester-del-2024-con-el-ingreso-de-40-proyectos-nuevos-se-fortalece-la>

El desgaste prematuro de los blindajes en las turbinas de la Pequeña Central Hidroeléctrica Palmas genera altos costos de mantenimiento, afectando la rentabilidad y eficiencia operativa de la planta. Esta situación implica gastos directos en materiales y mano de obra, y pérdidas económicas por paradas no programadas. Identificar las causas y plantear soluciones permitirá optimizar la vida útil de los blindajes realizando una operación más eficiente. Además, el impacto ambiental de este problema no es menor, ya que una mejor eficiencia operativa contribuirá a la producción estable de energía renovable, favoreciendo el abastecimiento eléctrico con menor impacto ecológico y promoviendo la sostenibilidad del sistema hidroeléctrico.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Analizar los factores que afectan los mecanismos de desgaste en los blindajes de las turbinas hidroeléctricas de la Central Hidroeléctrica Palmas con el fin de desarrollar estrategias que incrementen su vida útil, eficiencia y sostenibilidad de la planta.

1.2 Objetivos Específicos

Diagnosticar la situación actual de las unidades de generación de la Central Hidroeléctrica Palmas, mediante el análisis histórico de los registros de operación, mantenimiento y fallas, con el fin de establecer su contexto operacional actual.

Realizar un estudio mediante la aplicación de la metodología del Análisis Causa Raíz (ACR) teniendo en cuenta la norma UNE-EN 62740, con la finalidad de identificar de manera sistemática y efectiva las causas fundamentales de los problemas de desgaste de los blindajes en las turbinas.

Proponer recomendaciones con respecto a prácticas de mantenimiento preventivo y mejorativo, ya sea selección de material o tratamiento de superficie, con el fin de optimizar la durabilidad de los blindajes de las turbinas.

2. Marco Teórico

2.1 Antecedentes

Pachón Medina (2015) desarrolló la tesis titulada Implementación del proceso de proyección térmica HVOF para la generación de recubrimientos (WC-Co-Cr) en aceros CrNi como tratamiento para incrementar la resistencia al desgaste por erosión de partículas sólidas (Universidad de los Andes). El objetivo general fue evaluar la resistencia al desgaste erosivo de recubrimientos WC-Co-Cr aplicados mediante proyección térmica HVOF sobre aceros inoxidables martensíticos utilizados en el sector hidroeléctrico. La metodología incluyó la aplicación experimental del recubrimiento, caracterización microestructural, medición de dureza, análisis de composición química y ensayos de erosión por partículas sólidas, comparando el comportamiento del material base frente al recubierto. Los resultados evidenciaron una mejora significativa en la resistencia al desgaste del material tratado, concluyendo que el proceso HVOF es una alternativa técnicamente viable para ambientes con alta carga de sedimentos.

Este antecedente resulta pertinente para la presente investigación, ya que aborda el mismo mecanismo de desgaste erosivo en componentes hidroeléctricos y respalda técnicamente la evaluación de recubrimientos como estrategia para incrementar la vida útil de los blindajes analizados.

Neopane, H. P. (2010). Sediment erosion in hydro turbines en su investigación se enfocó en la erosión por sedimentos como un problema global en turbinas hidráulicas, especialmente Francis, debido al impacto de partículas cuando el flujo con sedimentos pasa por superficies sólidas. La metodología combinó estudios experimentales, simulaciones numéricas y observaciones de campo para analizar el movimiento de partículas y las tasas de erosión en configuraciones similares a turbinas Francis. Los resultados mostraron que el daño erosivo

depende de tamaño, forma y concentración de partículas, así como de las condiciones hidráulicas de operación, y que el fenómeno es complejo por múltiples factores concurrentes. Se concluyó que comprender las características de los sedimentos y el flujo es fundamental para predecir y prevenir la erosión, y que se necesitan estrategias de diseño y operación que consideren este fenómeno para aumentar la vida útil de los componentes.

Madero Ortiz (2016) desarrolló la tesis *Estudio tribológico de aleaciones antidesgaste* en la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, cuyo objetivo fue comparar el comportamiento de diferentes materiales sometidos a desgaste erosivo por partículas sólidas. La metodología incluyó ensayos bajo norma ASTM G76, análisis microestructural y medición de pérdida de masa en aceros y aleaciones antidesgaste. Los resultados evidenciaron que materiales con mayor dureza y presencia de carburos presentan menor tasa de desgaste frente a abrasión severa. Se concluyó que la microestructura y composición química influyen directamente en la resistencia al desgaste.

Este antecedente es pertinente para la presente investigación porque sustenta técnicamente la necesidad de evaluar la idoneidad del acero SAE 1060 frente a condiciones de sedimentación y abrasión en turbinas hidráulicas.

2.2 Marco Referencial

El presente marco teórico tiene como propósito establecer los fundamentos necesarios para el desarrollo del estudio sobre el desgaste de los blindajes de las turbinas de la PCH Palmas, por lo cual, se empezará con los conceptos más generales asociados a las centrales hidroeléctricas, contextualizando el funcionamiento y encaminando a un entendimiento más específico sobre la central la cual se está realizando el trabajo.

2.2.1 Generación hidroeléctrica y Pequeñas Centrales Hidroeléctricas.

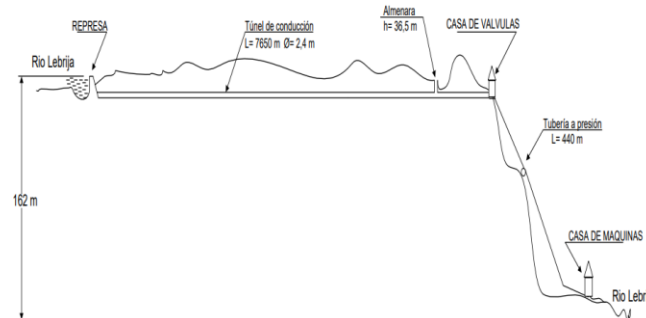
La generación hidroeléctrica se basa en la transformación de la energía del potencial del agua en energía eléctrica mediante turbinas y generadores. Aprovecha la altura del agua para generar movimiento mecánico, que luego se convierte en energía eléctrica. Este proceso convierte al recurso hídrico en la materia prima esencial del sistema, estableciendo una relación directa entre las condiciones naturales del entorno y el desempeño operativo de la central.

Dentro de este contexto, las Pequeñas Centrales Hidroeléctricas (PCH) se caracterizan por operar con menores alturas de caída y caudales moderados en comparación con las grandes centrales, pero bajo un régimen de operación continuo y altamente dependiente de la variabilidad del río que las alimenta. A diferencia de otros sistemas de generación, en las PCH la capacidad de producción no está determinada por la demanda del mercado, sino por la disponibilidad hidráulica, lo que implica que los equipos deben adaptarse permanentemente a cambios estacionales de caudal, calidad del agua y concentración de sedimentos. Bajo estas condiciones, comprender el funcionamiento de las turbinas hidráulicas y las zonas donde se concentra el desgaste se convierte en un elemento clave para abordar técnicamente los problemas asociados a la degradación de componentes como los blindajes, los cuales se encuentran directamente expuestos a la interacción entre el flujo de agua y el material.

La Pequeña Central Hidroeléctrica Palmas (PCH Palmas) es una central de embalse con regulación diaria que aprovecha las aguas del río Lebrija para la generación de energía eléctrica. El proceso inicia con la captación del agua en el embalse, la cual es conducida a través de un túnel de conducción de aproximadamente 7.6 km de longitud, con diámetros que varían entre 2.4 y 3 metros. El túnel desemboca en la Almenara, donde el flujo se estabiliza antes de entrar a las tuberías de presión, encargadas de transportar el caudal hacia las unidades generadoras.

Figura 1.

Esquema general del sistema de conducción.



Nota. Tomado de ESSA (2024). MANUAL OPERACIÓN PLANTA PALMAS.

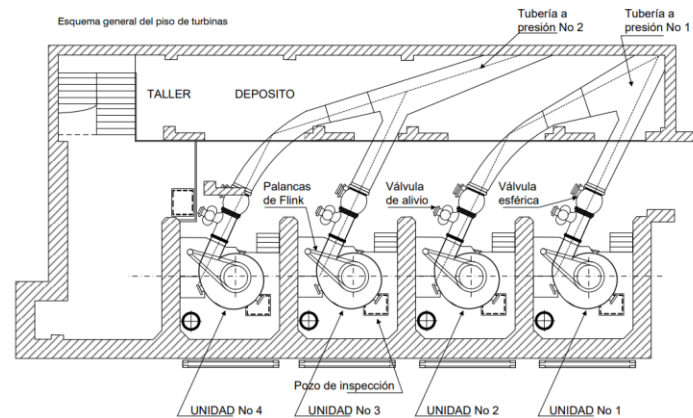
Cada tubería, con una longitud de 440 metros y diámetros de 1.3 y 1.5 metros, suministra el caudal a cuatro turbinas Francis de eje vertical, con una potencia unitaria de 4.5 MW, que trabajan a una altura piezométrica de 117 m. El agua llega al distribuidor, donde los álabes directrices regulan la cantidad y dirección del flujo que impacta el rodete Francis. Una vez el agua sale de la turbina, pasa por el tubo de aspiración, que permite recuperar parte de la presión y guiar el flujo hacia el canal de descarga, devolviéndolo nuevamente al cauce natural del río.

2.2.2 Turbina hidroeléctrica

Dispositivo que convierte la energía del agua en movimiento en energía mecánica, para que posteriormente en un generador, se transforme en energía eléctrica. Funciona mediante el impacto del agua sobre sus álabes. Un ejemplo es la turbina tipo Francis, común en pequeñas centrales hidroeléctricas. La PCH Palmas presenta un grupo turbina donde están todos los componentes presentes de la parte mecánica encargados de realizar la transformación de energía.

Figura 2.

Esquema general del piso de turbinas.



Nota. Tomado de ESSA (2024). MANUAL OPERACIÓN PLANTA PALMAS.

Es el sistema encargado de recibir la energía hidráulica que trae el agua (Presión de 15 bares y caudal en la tubería a presión de 3.5 m³/seg) transformándola en energía mecánica por medio de los álabes del rodete por un torque mecánico y una velocidad angular de 720 rpm equivalentes a una potencia de 6.500 HP. Es una turbina de reacción del tipo Francis, se dice que es de reacción porque utiliza la energía de presión y velocidad que lleva el agua para transformarla en energía mecánica, que es transmitida directamente al eje del generador.

Tabla 1.

Descripción Turbina Francis

Tipo	Francis Vertical
Potencia	6.500 CV nominal
Cabeza Neta	130 m
Caudal	3,5 m ³ /s
Velocidad	720 rpm
Fabricante	CHARMILLES

Nota. La tabla contiene las características presentes de la turbina existente en la PCH Palmas. Tomado de ESSA (2024). MANUAL OPERACIÓN PLANTA PALMAS.

La turbina que se usa en la PCH Palmas es una turbina tipo Francis de eje vertical, donde se tiene un total de 4 unidades, con una capacidad de generación de 4.5 MW por cada una.

2.2.3 Blindaje de turbina

Estructuras de protección diseñadas para reducir el desgaste directo en las turbinas hidroeléctricas. Su función principal es preservar la integridad de los componentes expuestos al flujo de agua y sedimentos, optimizando la eficiencia, reduciendo costos de mantenimiento y prolongando la vida útil de la turbina. Pueden fabricarse con materiales de alta resistencia o polímeros especializados, dependiendo de las condiciones específicas de uso.

2.2.4 Indicadores de Confiabilidad

Disponibilidad Total

La disponibilidad total representa la fracción del tiempo durante el cual un activo está en condiciones de operar, considerando todas las causas de indisponibilidad, tanto como fallas como paradas programadas. Se calcula de la siguiente manera:

$$A_t = \frac{H_{op}}{H_{op} + H_{fo} + H_{po}}$$

Donde,

H_{op} : horas efectivas de operación.

H_{fo} : horas forzadas totales (falla + causas externas).

H_{po} : horas programadas.

Disponibilidad Operativa

La disponibilidad operativa representa la fracción del tiempo durante el cual un activo está en condiciones de operar, considerando fallas y causas externas, pero excluyendo paradas programadas. Se calcula de la siguiente manera:

$$A_o = \frac{H_{op}}{H_{op} + H_{fo}}$$

Donde,

H_{op} : horas efectivas de operación.

H_{fo} : horas forzadas totales (falla + causas externas).

Tasa de salida forzada por fallas

Representa la fracción del tiempo en que el equipo está fuera de servicio exclusivamente por fallas presentadas. Se calcula de la siguiente manera:

$$FOR = \frac{H_{fa}}{H_{op} + H_{fa}}$$

Donde,

H_{op} : horas efectivas de operación.

H_{fa} : horas forzadas por fallas reales.

Tiempo Medio entre Fallas:

El tiempo medio entre fallas (MTBF) mide el tiempo promedio en que un sistema opera correctamente antes de que presente una falla. Se calcula de la siguiente manera:

$$MTBF = \frac{H_{op}}{N_f}$$

Donde,

H_{op} : horas efectivas de operación

N_f : número de fallas reales registradas.

Tasa de Falla

La tasa de falla es el número de fallas que ocurren por unidad de tiempo. Es el inverso de MTBF y se calcula de la siguiente manera:

$$\lambda = \frac{1}{MTBF}$$

Donde,

MTBF: Tiempo medio entre fallas

Tiempo medio de reparación:

El tiempo medio de reparación (MTTR) mide cuanto tiempo tarda, en promedio, un sistema en volver a operar después de una falla. Se calcula de la siguiente manera:

$$MTTR = \frac{H_{fa}}{N_f}$$

Donde,

H_{fa} : horas forzadas por fallas reales.

N_f : número de fallas reales registradas.

Disponibilidad intrínseca:

La disponibilidad intrínseca representa la disponibilidad del equipo considerando únicamente las fallas y reparación del equipo, más no los factores externos, sino lo que le corresponde a la máquina. Se calcula como:

$$A_i = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$$

Donde,

MTBF: Tiempo medio entre fallas.

MTTR: Tiempo medio de reparación.

2.2.5 Desgaste

El desgaste es la pérdida progresiva de material en la superficie de un componente debido a la interacción con su entorno. En el caso de las turbinas hidroeléctricas, este fenómeno se produce principalmente por el contacto continuo con el agua y los sedimentos en suspensión, generando distintos tipos de desgaste que afectan su eficiencia y vida útil.

El desgaste por cavitación proviene del impacto de las burbujas de aire que viajan en el flujo de líquido, debido a una caída de presión, sobre las superficies a su paso, causando desgaste. En las turbinas hidroeléctricas, la cavitación es una de las principales causas de daño en los álabes y blindajes, reduciendo su eficiencia y aumentando costos de mantenimiento.

El desgaste erosivo se produce cuando el flujo de líquido transporta partículas en alta velocidad que impactan las superficies, desprendiendo pequeñas capas de material. En las turbinas hidroeléctricas, este tipo de desgaste afecta principalmente los bordes de ataque de los álabes y las zonas expuestas al flujo rápido del agua. La selección de materiales resistentes y tratamientos de superficie adecuado pueden disminuir los efectos de este tipo de desgaste.

Finalmente, el desgaste triboquímico ocurre por la combinación de desgaste mecánico y reacciones químicas en la superficie del material. En turbinas hidroeléctricas, se presenta cuando los blindajes están expuestos a agua con alto contenido de oxígeno o contaminantes corrosivos, lo cual acelera la degradación del material.

2.2.6 Materiales y criterios de selección para blindajes hidráulicos

La selección del material para los blindajes de turbinas hidroeléctricas no puede basarse únicamente en criterios tradicionales de resistencia mecánica o facilidad de fabricación. Debido a su función protectora y a las condiciones extremas a las que están sometidos, estos elementos deben elegirse considerando principalmente su comportamiento frente a fenómenos de desgaste asociados al flujo de agua cargado de sedimentos.

En entornos hidráulicos donde existen partículas sólidas en suspensión, la dureza del material, su tenacidad, su resistencia a la erosión y su capacidad para soportar impactos repetitivos se convierten en propiedades determinantes. Un material con alta resistencia estructural puede no ser adecuado si no posee suficiente resistencia al desgaste erosivo o si presenta baja resistencia a la cavitación, lo que conduce a una pérdida acelerada de espesor bajo condiciones reales de operación. Esta perspectiva permite comprender que el problema del desgaste prematuro no siempre está asociado a fallas del diseño mecánico, sino a decisiones de selección de materiales

que pueden no responder adecuadamente a las condiciones reales de operación del sistema hidráulico.

2.2.7 Teorías del mantenimiento

El mantenimiento ha evolucionado desde enfoques correctivos, donde la intervención se realizaba únicamente después de presentarse una falla, hacia estrategias preventivas, predictivas y basadas en confiabilidad. Esta evolución ha sido especialmente relevante en sistemas hidroeléctricos, donde la operación continua y la alta dependencia del recurso hídrico exigen niveles elevados de disponibilidad y confiabilidad de los equipos.

El mantenimiento preventivo son las acciones planificadas que se realizan de manera periódica con el fin de reducir las fallas que se puedan generar en los equipos. Este puede incluir inspecciones visuales, auditivas, lubricación, ajustes, y sustitución de piezas antes que se presenten fallos. Luego, se tiene el mantenimiento mejorativo, siendo la implementación de mejoras en los equipos o procesos para optimizar su rendimiento, aumentar su vida útil o adaptarlos a nuevas necesidades operativas. Implica modificaciones, rediseños o actualizaciones tecnológicas.

El monitoreo de condición constituye la base del mantenimiento predictivo, al permitir evaluar el estado real de los equipos a partir del análisis continuo de variables operativas. En turbinas hidroeléctricas, parámetros como la vibración, la temperatura de cojinetes, la velocidad de operación y las presiones internas reflejan de manera indirecta el comportamiento hidráulico del sistema y el estado de sus componentes internos.

A diferencia del mantenimiento preventivo, que se fundamenta en intervalos de tiempo predefinidos, el mantenimiento predictivo se apoya en la interpretación de tendencias. Esto permite

identificar desviaciones progresivas respecto al comportamiento normal del equipo, anticipando condiciones que pueden derivar en fallas o en pérdida de eficiencia.

Esta relación entre variables medidas y fenómenos hidráulicos internos convierte al monitoreo de condición en una herramienta clave para la gestión de componentes sometidos a desgaste, como los blindajes. A medida que estas superficies pierden simetría por efecto de la erosión y la cavitación, el flujo dentro de la turbina se vuelve más turbulento, generando desbalances que se reflejan directamente en las mediciones de vibración, temperatura y estabilidad de la velocidad.

2.2.8 Mantenimiento centrado en confiabilidad

El Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM) surge como una metodología orientada a determinar de forma estructurada cuáles fallas pueden ser gestionadas mediante mantenimiento y cuáles requieren acciones de rediseño o modificación del sistema. A diferencia de los enfoques tradicionales basados en tiempos de intervención, el RCM parte del análisis del contexto operacional, las funciones del sistema y los modos de falla que pueden afectar su desempeño.

En turbinas hidráulicas, esta metodología adquiere especial relevancia debido a que muchos de sus componentes no fallan por envejecimiento o fatiga, sino por la interacción continua con el entorno hidráulico. Elementos como los blindajes, que están expuestos de forma permanente al flujo cargado de sedimentos, presentan un deterioro que depende más de las condiciones del río que del tiempo de operación, lo que hace que las rutinas de mantenimiento preventivo tradicionales no resulten efectivas para controlar su desgaste.

El RCM permite analizar este tipo de modos de falla mediante un algoritmo de decisión que evalúa si existen tareas de mantenimiento capaces de prevenir o mitigar el deterioro. Cuando se determina que no es posible controlar el modo de falla mediante intervenciones periódicas, la metodología conduce a la conclusión de que es necesario implementar cambios en el diseño, en el material o en la forma en que se gestiona el componente.

2.2.9 Análisis Causa Raíz

El análisis causa raíz (RCA) es una metodología sistemática utilizada para identificar las causas fundamentales de un evento no deseado, con el propósito de eliminar su recurrencia mediante acciones que sean completamente efectivas. El RCA busca comprender la cadena completa de eventos que llevan a la falla, abarcando todos los aspectos posibles.

El RCA se fundamenta en la premisa de que los fallos recurrentes rara vez tienen una única causa técnica, sino que suelen ser el resultado de decisiones de diseño, operación y gestión que permiten que el problema se repita en el tiempo. De acuerdo con la norma UNE-EN 62740, el análisis debe estructurarse de forma jerárquica, diferenciando entre causas físicas, causas humanas y causas latentes, y validando cada hipótesis mediante evidencias verificables. Este enfoque permite identificar la causa raíz real del evento, entendida como aquella cuya eliminación previene la repetición del fallo, y no simplemente como el mecanismo físico mediante el cual se manifiesta.

Las causas físicas corresponden a los mecanismos técnicos mediante los cuales se manifiesta una falla en un sistema. Están asociados a fenómenos observables como desgaste, fatiga, corrosión, vibraciones, o fallas de material, representando como ocurre el daño desde un punto de vista ya sea mecánico, hidráulico, térmico, o químico. En el RCA, constituyen el primer nivel de análisis, ya que describen el comportamiento del activo frente a las condiciones reales de

operación. Su identificación se apoya en evidencias técnicas tales como inspecciones visuales, mediciones, registros operativos, y sirven como punto de partida para profundizar hacia niveles causales superiores.

Las causas humanas se refieren a las acciones realizadas por el personal que influyen directa o indirectamente en la falla ocurrida. Estas pueden ser errores en la operación, selección inadecuada de materiales, incumplimiento de procedimientos, malos diseños, o negligencias. Las causas humanas explican por qué las condiciones físicas que originaron la falla no fueron detectadas, corregidas o evitadas oportunamente. Su análisis permite identificar oportunidades de mejora en prácticas operativas y procesos técnicos, y establece el vínculo entre el comportamiento del sistema y las decisiones adoptadas durante su diseño, operación o mantenimiento.

Las causas latentes corresponden a deficiencias estructurales del sistema organizacional que crean el entorno propicio para que las causas humanas y físicas se desarrollen. Están relacionadas con la gestión de procesos y la cultura organizacional de la empresa. Estas no generan la falla de forma inmediata, pero son las que permiten que el problema persista y se pueda repetir a lo largo del tiempo. De cierto modo, estas se consideran las causas raíz reales, ya que la eliminación o arreglo de esta es la que tiene mayor impacto en la recurrencia del evento.

El factor contribuyente son condiciones que, aunque no sean considerados la causa raíz, influyen en la probabilidad de que un problema ocurra, o la severidad en la que este pueda suceder. No generan el problema por si solos, pero si facilitan o agravan el desarrollo de las causas previamente identificadas. Permiten comprender porque un fenómeno puede manifestarse de forma más fuerte, y la corrección de estos factores permiten realizar soluciones completas que abarquen diferentes puntos de vista del problema.

2.2.10 Estrategias de ingeniería para aumentar la vida útil de los blindajes

El aumento de la vida útil de los blindajes en turbinas hidroeléctricas requiere integrar decisiones de ingeniería con estrategias de mantenimiento basadas en condición. Dado que su deterioro está determinado por la interacción permanente con el entorno hidráulico, no es suficiente aplicar rutinas preventivas por tiempo; es necesario intervenir tanto en la resistencia del componente como en la forma en que se gestiona su desgaste.

Desde la ingeniería, la selección de materiales con mayor resistencia al desgaste y la aplicación de recubrimientos superficiales especializados constituyen medidas directas para reducir la velocidad de pérdida de material frente a la erosión y cavitación. Estas acciones no eliminan el fenómeno, pero modifican su tasa de ocurrencia y protegen las superficies estructurales de la turbina. Complementariamente, el mantenimiento debe orientarse al seguimiento del estado real de los blindajes. La medición periódica de espesores mediante ultrasonido, el análisis de tendencias de vibración, temperatura y velocidad, y el registro individual del comportamiento de cada unidad permiten programar las intervenciones en el momento técnicamente adecuado.

2.3 Normas utilizadas

El estudio del desgaste presente en las turbinas requiere el uso de metodologías estructuradas que permitan analizar mejor el problema. Es por esto por lo que el trabajo se apoya en normas técnicas, las cuales proporcionan una metodología concreta para los diferentes puntos.

2.3.1 Norma SAE JA1011 y JA1012

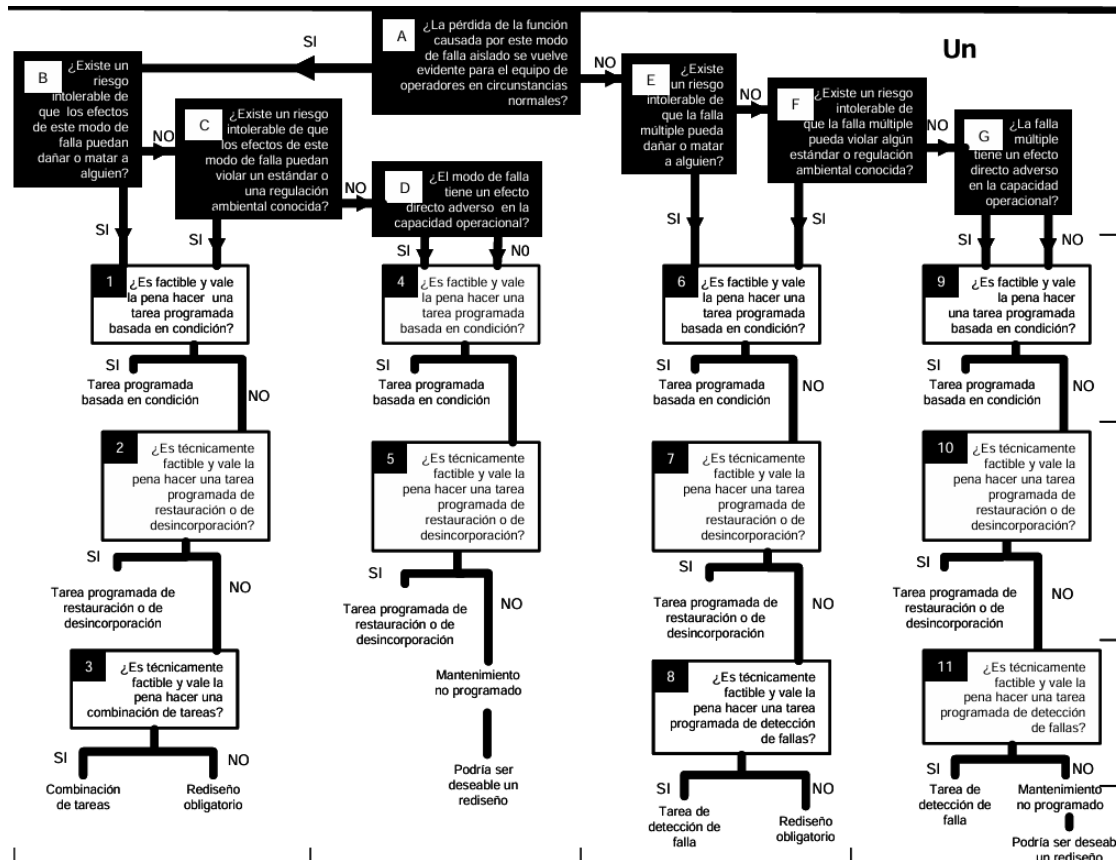
La norma SAE JA1011 establece los criterios mínimos que debe cumplir un proceso de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM) para ser considerado válido. Define las siete preguntas fundamentales del RCM, orientadas al análisis funcional del activo, identificación de modos de falla, evaluación de consecuencias y selección de tareas de mantenimiento justificadas técnicamente. Esta norma no impone una metodología específica, sino que fija los requisitos que garantizan coherencia y rigor en la toma de decisiones. En la presente investigación, la SAE JA1011 sustenta el enfoque estructurado utilizado para analizar el desgaste de los blindajes y definir estrategias de mantenimiento basadas en criticidad y consecuencias operacionales.

La norma SAE JA1012 establece los criterios que debe cumplir un proceso para ser considerado formalmente como mantenimiento centrado en confiabilidad. Esta norma da la metodología para definir de forma clara el contexto operacional, el cual condiciona el comportamiento del sistema para poder caracterizarlo de forma óptima.

Adicionalmente, la norma incorpora el algoritmo de decisión del RCM, el cual permite evaluar de manera efectiva la viabilidad de diferentes estrategias de mantenimiento frente a la falla encontrada. A través de este algoritmo es posible determinar si un modo de falla puede ser gestionado mediante mantenimiento preventivo programado, mantenimiento basado en condición, tareas de restauración o descarte, o si, en caso contrario, no es técnicamente viable su prevención mediante mantenimiento, la consideración de alternativas de rediseño.

Figura 3.

Algoritmo de decisión Norma SAE JA1012.



Nota. La figura presenta el algoritmo de decisión dispuesto en la norma SAE JA1012.

A través de una secuencia de preguntas orientadas al riesgo, consecuencias operacionales y viabilidad técnica, el algoritmo permite determinar si se requiere una tarea programada, monitoreo por condición, restauración, rediseño o mantenimiento no programado.

2.3.2 Norma UNE-EN 62740

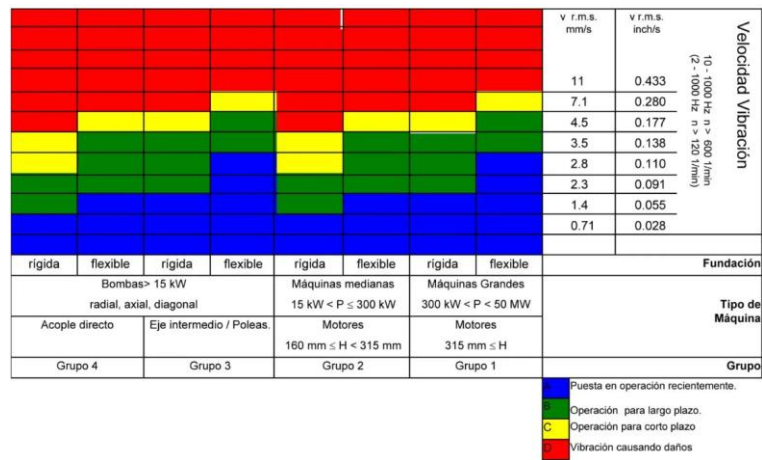
La norma UNE-EN 62740 establece los lineamientos para la aplicación del análisis causa raíz como herramienta para la investigación sistemática de fallas. Su objetivo principal es identificar las causas fundamentales de un problema, definiendo un proceso estructurado que incluye la recopilación de la información y la validación de las causas raíz identificadas. Se utiliza la norma como base metodológica para el ACR garantizando la veracidad de las conclusiones.

2.3.3 Norma ISO 10816-3 / ISO 20816-5

Las normas ISO 10816-3 / ISO 20816-5 establecen criterios para la evaluación de las vibraciones de maquinaria rotativa a partir de mediciones realizadas. Estas normas permiten clasificar el estado dinámico de los equipos para saber si están en rangos aceptables.

Figura 4.

Esquema de criticidad para vibraciones según norma ISO 10816-3.



Nota. Clasificación de severidad vibratoria según norma ISO. Tomada de norma International Organization for Standardization. (2009). ISO 10816-3: Mechanical vibration — Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts.

En el presente trabajo, esta norma se utiliza como referencia para analizar los niveles de vibración de las unidades de la Pequeña Central Hidroeléctrica Palmas, para conocer como los valores de vibración pueden ayudar a encontrar un problema relacionado a esto.

3. Metodología

La metodología empleada en el desarrollo de este trabajo corresponde a un estudio de caso con enfoque descriptivo–analítico y aplicación de ingeniería basada en confiabilidad, orientado a analizar de manera sistemática el desgaste de los blindajes en las turbinas de la PCH Palmas. Para ello, se integró el estudio del contexto operacional, el análisis de fallas y la evaluación de estrategias de mantenimiento. El trabajo se desarrolló en fases secuenciales que permitieron comprender de forma ordenada el fenómeno estudiado, garantizando la coherencia entre los objetivos planteados, el marco teórico y las conclusiones obtenidas. La metodología se basó en un trabajo de ingeniería aplicado, orientado a la comprensión de un problema real de operación mediante el análisis técnico de datos, la aplicación de metodologías de confiabilidad y la formulación de soluciones prácticas fundamentadas en principios de materiales, tribología y mantenimiento.

3.1 Etapas del desarrollo metodológico

Se elaboró un plan de actividades fundamentado en organizar de forma secuencial las acciones necesarias para abordar el problema de desgaste de los blindajes desde un enfoque técnico, operacional y de mantenimiento. Este plan permitió estructurar el trabajo de manera coherente con los objetivos planteados, garantizando una relación directa entre el diagnóstico realizado, el análisis aplicado y las propuestas formuladas.

3.2.1 Fase de investigación

En esta fase se establecerán los primeros contactos con la empresa para identificar la necesidad del estudio. Se determinarán los recursos necesarios y se recopilará bibliografía

relevante para la conceptualización del problema. Además, se definirán los objetivos y la justificación del proyecto, junto con la elaboración de un cronograma detallado de actividades.

3.2.2 Fase de estudio

Durante esta fase se realizará una revisión exhaustiva de la literatura existente sobre el desgaste en turbinas hidroeléctricas, sus mecanismos y posibles soluciones. Se sustentará el plan de proyecto ante la institución para validar su viabilidad y obtener retroalimentación para su mejora.

3.2.3 Fase de Diagnóstico

En esta etapa se diagnosticó el contexto operacional de la central a partir del análisis de la información histórica de operación y mantenimiento del periodo 2020–2024. Se revisaron las horas de operación por unidad, los registros de paradas no programadas, los eventos de falla, los valores históricos de vibración, temperatura y velocidad, así como los caudales operativos y su variación a lo largo del año. También se tuvo en cuenta la información relacionada con mantenimientos realizados, tiempos de intervención y costos de repuestos. El análisis de estos datos permitió identificar la relación entre las condiciones de operación, las fallas registradas y el desgaste observado en los blindajes, proporcionando una comprensión clara del problema.

3.2.4 Fase de Análisis Causa Raíz

En esta etapa se aplicó la metodología de Análisis de Causa Raíz (ACR) para identificar las causas primarias y secundarias del desgaste de los blindajes. Para ello, se utilizaron como herramientas el diagrama de árbol, la clasificación de causas físicas, humanas y latentes establecida

en la norma UNE-EN 62740, y el análisis de evidencias a partir de registros operativos, fotografías de inspección y datos históricos recopilados. A partir de este análisis se identificaron los principales mecanismos de desgaste presentes y su relación con las condiciones reales de operación, permitiendo definir estrategias de mitigación coherentes con el problema identificado. Para la estructuración lógica de las causas identificadas, se empleó el diagrama de árbol como herramienta principal, permitiendo descomponer el problema de forma jerárquica y relacionar las causas físicas, humanas y latentes asociadas al desgaste observado en los blindajes.

3.2.5 Fase de Recomendaciones

Se evaluarán materiales alternativos y tratamientos de superficie que puedan mejorar la durabilidad de los blindajes. Además, se desarrollarán estrategias de mantenimiento preventivo y mejorativo que reduzcan el impacto del desgaste, optimizando la operación de la central.

La validez del análisis se fundamenta en la triangulación de evidencias provenientes de registros históricos, inspecciones visuales, análisis hidrosedimentológico y criterios normativos, lo cual reduce la incertidumbre asociada al diagnóstico.

4. Diagnóstico PCH Palmas

El propósito de esta sección será diagnosticar la condición operativa y técnica de las unidades de generación de la Central Hidroeléctrica Palmas, a partir del análisis histórico de la información de operación, mantenimiento, confiabilidad y monitoreo de condición. Este diagnóstico busca establecer el estado actual del sistema de generación, evaluando su desempeño en términos de disponibilidad, comportamiento vibracional, temperatura de cojinetes y registros de fallas entre los años 2020 y 2024.

El desarrollo de este objetivo permite contar como referencia, describiendo el comportamiento hidráulico y mecánico real de las unidades, identificando aquellas que presentan mayores problemáticas, y proporcionando una visión integral del contexto operacional.

4.1 Contexto operacional

De acuerdo con los lineamientos establecidos en la norma SAE JA1012 para la aplicación del Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM), el primer paso para el análisis de un sistema industrial consiste en la definición clara y estructurada de su contexto operacional. Este contexto permite comprender las condiciones reales bajo las cuales opera el sistema. En este sentido, antes de abordar el análisis de fallas o la identificación de causas asociadas al desgaste de los blindajes, se procede a caracterizar el sistema de generación de la Central Hidroeléctrica Palmas, considerando aspectos fundamentales como los presentados a continuación.

4.1.1 Tipo de proceso

La Central Hidroeléctrica Palmas opera bajo un proceso continuo de generación de energía, ya que el flujo de agua del río Lebrija circula permanentemente a través de las turbinas mientras

se mantenga el caudal ecológico. Esto permite una operación las 24 horas del día durante todo el año, exceptuando periodos de mantenimiento programado o contingencias. Las unidades generadoras permanecen sincronizadas al Sistema Interconectado Nacional, aportando potencia de forma estable y respondiendo directamente a las variaciones naturales del caudal. Esta condición establece un entorno operacional de alta exigencia en confiabilidad, donde la salida inesperada de una unidad afecta de manera inmediata la continuidad del despacho energético.

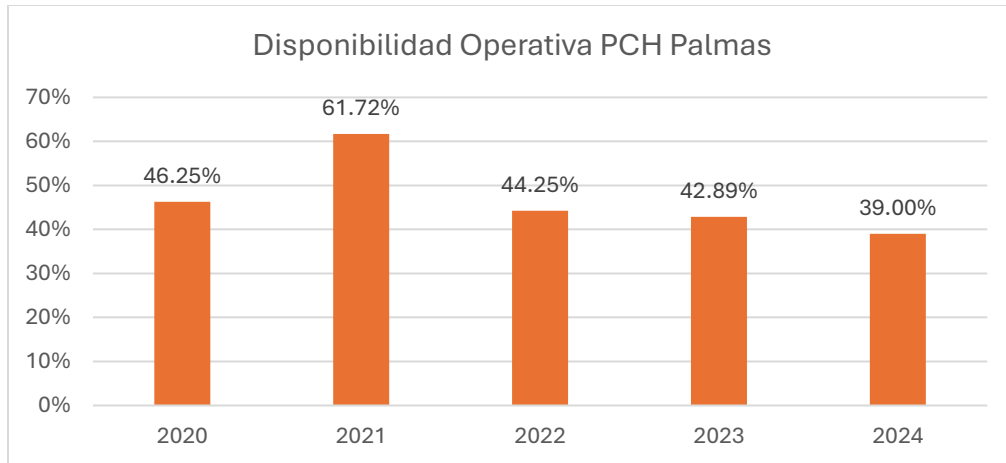
4.1.2 Redundancia y Disponibilidad

La central hidroeléctrica Palmas no cuenta con unidades redundantes ya que no existen turbinas de respaldo que puedan reemplazar de manera inmediata a una unidad fuera de servicio. Sin embargo, su disposición en paralelo le otorga flexibilidad, permitiendo alternar la operación acuerdo con la disponibilidad hidráulica y las necesidades de mantenimiento. Durante los periodos de bajo caudal, característicos de las temporadas secas, se aprovecha la reducción del flujo para realizar intervenciones programadas en una o varias unidades, mientras las demás permanecen en operación, garantizando así la continuidad en la generación.

La disponibilidad real de la planta está condicionada por el caudal que pueda ofrecer el río Lebrija y por la programación de mantenimientos mayores. De acuerdo con los registros históricos entre 2020 y 2024, la disponibilidad de la planta en esa época fue del 46,62%, alcanzando valores mayores al 50% en épocas de caudal alto y descendiendo en promedio al 25% durante los meses de bajo caudal o cuando coincidían mantenimientos mayores. En este contexto, la gestión de la disponibilidad se convierte en un proceso dinámico que presenta bastantes fluctuaciones.

Figura 5.

Disponibilidad Operativa PCH Palmas.



Nota. Disponibilidad total de la planta según el año de recolección de datos.

4.1.3 Estándares de calidad

Se tiene un sistema de gestión integral basado en normas técnicas que aseguran la calidad del proceso de generación y del mantenimiento de los activos hidráulicos. El manual de mantenimiento de la PCH Palmas (MPSGI002) establece procedimientos para la verificación de vibraciones, control de lubricantes, balanceo dinámico y calibración de sensores, garantizando la calidad de la información. Además, la empresa trabaja bajo principios de mejora continua orientados a preservar el rendimiento hidráulico y la vida útil de componentes críticos como blindajes, cojinetes y sellos mecánicos.

4.1.4 Estándares de seguridad

La operación y el mantenimiento de la central se rigen por protocolos de seguridad mecánica y eléctrica orientados a proteger al personal y a los equipos. Estos se basan en la aplicación de las “Cinco Reglas de Oro”: desconexión, verificación de ausencia de tensión, conexión a tierra, delimitación del área y protección de las zonas de trabajo. El uso de equipos de protección personal es obligatorio, especialmente en trabajos en altura o en zonas confinadas como

el túnel. El ingreso a áreas hidráulicas y a la casa de máquinas requiere autorización del jefe de mantenimiento, y las maniobras sobre válvulas o compuertas se realizan bajo supervisión directa. Estas prácticas permiten desarrollar las actividades en un entorno controlado y seguro, en concordancia con las políticas de seguridad industrial de la empresa.

4.1.5 Estándares ambientales

La Central Hidroeléctrica Palmas se encuentra sujeta a las políticas ambientales de ESSA, que es supervisada por la CDMB, y al cumplimiento de la normatividad colombiana sobre aprovechamiento hídrico y vertimientos. La operación se rige bajo un enfoque de sostenibilidad ambiental, que busca mantener el equilibrio ecológico del río Lebrija, reducir los impactos en la fauna y flora acuática, y prevenir la contaminación de las aguas. En la planta se exige un seguimiento periódico de las características fisicoquímicas del agua, analizando parámetros como turbidez, pH, oxígeno disuelto y concentración de sedimentos.

4.1.6 Parámetros operativos

Las unidades de generación tipo Francis instaladas en la Central Hidroeléctrica Palmas operan a una velocidad nominal de 720 rpm, sincronizadas al sistema eléctrico de 60 Hz, con una potencia unitaria de 4,5 MW, lo que permite alcanzar una capacidad total instalada de 18 MW bajo condiciones hidráulicas normales. La operación de las turbinas depende directamente de la altura neta disponible, cercana a los 117 metros, y del caudal que ingresa a cada unidad, el cual se mantiene en valores promedio del orden de 3,5 m³/s, de acuerdo con los registros históricos analizados. Durante la operación se controlan continuamente los valores de vibración (en mm/s RMS), temperatura de cojinetes, y velocidad (en RPM). Los registros históricos muestran que la

Unidad 3 presenta los niveles de vibración más elevados, especialmente en el cojinete 4. Estos parámetros permiten verificar que el conjunto turbina-generador se mantenga dentro de condiciones estables y acordes con su diseño, además de servir como referencia para la detección temprana de comportamientos anómalos.

4.1.7 Régimen laboral

El personal de la Central Hidroeléctrica Palmas en operación continua las 24 horas, con turnos rotativos de 8 horas por trabajador. Cada turno incluye la supervisión de los parámetros eléctricos e hidráulicos, la ejecución de rutinas de inspección visual, y la toma de registros. Las actividades de mantenimiento preventivo se programan de manera semanal, mensual, bimensual, y anual, y las correctivas se ejecutan bajo planes de trabajo. En la planta trabajan técnicos especializados en mecánica, electricidad e instrumentación, además de apoyo externo para lo relacionado a actividades de taller y repuestos.

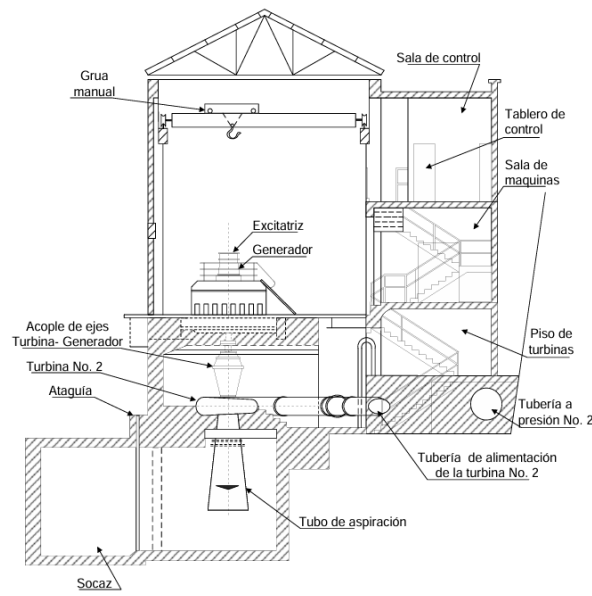
4.1.8 Ubicación de operación

La casa de máquinas de la Central Hidroeléctrica Palmas es el punto donde se integran los equipos principales del proceso de generación. En su nivel inferior se ubican las turbinas Francis, ancladas a la fundación y conectadas aguas arriba a las tuberías forzadas y aguas abajo al tubo de aspiración. En este conjunto hidráulico se encuentran los blindajes, que constituyen las superficies metálicas expuestas directamente al flujo de agua. En el nivel intermedio se localizan los generadores síncronos de eje vertical, acoplados al rodete mediante el eje principal. En el nivel superior se ubican los cojinetes, sistemas de lubricación y los tableros de control. La casa de máquinas cuenta además con el puente grúa para maniobras de mantenimiento y está conectada a

los transformadores y a la casa de válvulas, por donde se regula el paso del agua proveniente del túnel de conducción.

Figura 6.

Esquema general de la casa de máquinas.



Nota. Tomado de ESSA (2024). MANUAL OPERACIÓN PLANTA PALMAS.

4.1.9 Entorno de operación

El entorno operativo de la PCH Palmas está condicionado por el ecosistema tropical húmedo en el que se encuentra, con temperaturas promedio cercanas a los 25 °C y una humedad relativa elevada durante gran parte del año. Estas condiciones influyen en el mantenimiento de equipos eléctricos y electrónicos, que requieren un control constante de su aislamiento. En relación con el río Lebrija, la calidad del agua y la carga de sedimentos afectan directamente el desempeño de las turbinas. En temporadas de lluvia, el aumento del caudal trae consigo mayores sólidos en suspensión que impactan tanto los sistemas de limpieza como los componentes hidráulicos. En épocas secas, la disminución del caudal limita la generación. Adicionalmente, la contaminación

del río incrementa la turbidez y la presencia de residuos, afectando las condiciones de operación del sistema.

4.1.10 Repuestos y disponibilidad

La gestión de repuestos en la PCH Palmas se basa en un enfoque preventivo por criticidad, priorizando los elementos cuya falla afecta de forma inmediata la operación. Por ello, se mantienen en inventario repuestos de alta rotación como filtros, sellos, empaques y lubricantes, que permiten atender mantenimientos rutinarios sin generar largos tiempos de indisponibilidad. Sin embargo, los componentes principales del sistema hidráulico, como álabes, blindajes, anillos de desgaste y toberas, no se encuentran disponibles de forma permanente debido a su alto costo y fabricación específica. Estos deben ser solicitados a talleres externos, lo que incrementa considerablemente los tiempos de intervención cuando se presentan daños severos.

En consecuencia, la disponibilidad de estos elementos depende en gran medida de una adecuada planificación del mantenimiento y de la gestión logística con proveedores. En los últimos años, la empresa ha avanzado hacia un enfoque más preventivo y predictivo, buscando mejorar la planificación y la trazabilidad de las intervenciones sobre los activos críticos.

4.1.11 Consecuencias operativas de paradas

Las paradas no programadas son las que más afectan el rendimiento de la planta, ya que impactan directamente la producción de energía y la estabilidad. Cada evento de indisponibilidad genera pérdidas asociadas al incumplimiento del despacho con EPM y aumenta la carga sobre las demás unidades en servicio. La salida de una sola unidad representa una reducción del 25 % de la

capacidad instalada, situación que se agrava cuando los tiempos de reparación se prolongan, como ocurre con la unidad 4, fuera de operación por una falla en el caracol. Éstas paradas afectan la confiabilidad del sistema y el desempeño global de la central. La pérdida energética puede estimarse a partir de las horas fuera de servicio y la potencia nominal de 4,5 MW por unidad. En términos económicos, además del costo de los repuestos, se considera el valor de la energía no generada, cuyo promedio en los últimos años ha sido de 376,69 COP/kWh según XM.

4.1.12 Demanda del mercado

La energía generada por la PCH Palmas se entrega al Sistema Interconectado Nacional a través de EPM, por lo que la planta no participa directamente en el mercado ni ajusta su operación en función de la demanda comercial. En las centrales hidroeléctricas, la generación depende principalmente de la disponibilidad del recurso hídrico y no de variaciones inmediatas del mercado. El despacho eléctrico integra la energía producida según las necesidades del sistema, mientras que la capacidad real de generación de la planta está condicionada por el caudal del río Lebrija y su variación a lo largo del año. En este contexto, el desempeño de la central está determinado principalmente por factores hidráulicos más que por la dinámica del mercado energético.

4.1.13 Abastecimiento de materia prima

La única materia prima del proceso de generación es el agua del río Lebrija, cuyo caudal y calidad determinan el rendimiento operativo de la PCH. Durante los periodos de lluvia, el aumento del caudal incrementa la potencia generada, pero también la carga de sedimentos que intensifica el desgaste por erosión en los blindajes. En los periodos secos, la disminución del recurso hídrico

reduce la altura neta efectiva y limita la generación. Estas variaciones naturales obligan a ajustar continuamente la operación de compuertas y turbinas para mantener un desempeño estable del sistema.

4.2 Caracterización hidrosedimentológica del río Lebrija

Con el fin de identificar los factores ambientales que influyen en el desgaste de los blindajes de las turbinas, se analizó la información contenida en el informe “Servicio de análisis fisicoquímico y caracterización de sedimentos presentes en la conducción y fosos de turbina de la PCH Palmas” (ESSA, 2024). Los resultados obtenidos permitieron establecer las condiciones tanto físicas como químicas del agua, la composición mineralógica y el tamaño de partícula de los sedimentos que ingresan al sistema hidráulico de la planta.

Tabla 2.

Parámetros de calidad del agua - Río Lebrija

Parámetro	Unidad	Valor promedio	Interpretación técnica
Temperatura	°C	25.4	Agua templada, sin efectos térmicos relevantes.
Turbidez	FTU	14.4	Indica presencia de sólidos finos en suspensión.
Conductividad	μS/cm	298	Refleja baja salinidad, típica de aguas continentales.
pH	—	7.6	Ligera neutralidad; no se esperan fenómenos severos de corrosión ácida.
Oxígeno disuelto (OD)	mg/L	4.41	Nivel bajo que puede favorecer oxidación localizada (triboquímica).

Nota. Tabla de valores de parámetros del agua del río Lebrija. Tomado de ESSA (2024) – Informe de caracterización de sedimentos, Tabla 4-2.

El agua del río Lebrija presenta una turbidez moderada y un contenido de oxígeno relativamente bajo, condiciones que contribuyen al desgaste erosivo y a la posible formación de óxidos en los aceros al carbono. El pH neutro sugiere que no se producen procesos de corrosión generalizada. La oxidación localizada se produce cuando la capa pasiva del metal se rompe en zonas puntuales, permitiendo la formación de pequeñas picaduras o cráteres profundos. En la PCH Palmas, la combinación de impactos erosivos, cavitación y bajo oxígeno disuelto favorece este tipo de corrosión concentrada, acelerando el deterioro de los blindajes en zonas específicas de alta turbulencia.

Tabla 3.

Composición elemental de los sedimentos.

Elemento	Desarenador (% peso)	Casa de máquinas (% peso)	Interpretación
Si	39.55	39.57	Alta presencia de sílice puede causar gran erosión
Fe	22.82	23.29	Partículas ferrosas que incrementan la densidad y el impacto.
Al	18.25	18.19	Aporta dureza y abrasividad al material en suspensión.
K	8.49	8.63	Asociado a micas (moscovita). Contribuye al desgaste laminar.
Ca	3.49	2.93	Bajo contenido, sin efecto significativo.
Mg	2.61	2.12	Presente en silicatos tipo antigorita.
Ti	1.86	1.83	Elemento de alta dureza, refuerza el carácter abrasivo.

Nota. Elementos presentes en el agua del río Lebrija. Tomado de ESSA (2024) – Resultados FRX, Tablas 5-2 y 5-3.

El sedimento del río Lebrija está compuesto principalmente por sílice (SiO_2) y minerales aluminosilicatos como moscovita y albita, con partículas angulosas y alta dureza. Esta composición produce un efecto erosivo intenso al impactar superficies metálicas, especialmente en condiciones de alta velocidad del flujo.

Tabla 4.

Distribución de tamaño de partícula.

Sitio	D ₅₀ (μm)	Rango (μm)	Clasificación	Implicación en el desgaste
Desarenador	19.6	7–67	Arena muy fina / limo grueso	Partículas pequeñas penetran microfisuras del recubrimiento.
Casa de máquinas	15.3	7–67	Limo grueso	Alta capacidad de arrastre y contacto continuo con superficies.

Nota. La tabla muestra el valor promedio y el rango de las partículas presentes en dos sitios de la planta. Tomado de ESSA (2024) – Resultados SEM y difracción láser.

Las partículas finas de 15–25 μm tienen un gran poder de erosión al impactar repetidamente la superficie metálica. Su bajo tamaño favorece además la formación de cavitación al seguir el flujo turbulento dentro del tubo de aspiración y en los bordes de los blindajes.

Conclusión del análisis

El agua que alimenta la PCH Palmas posee alto contenido de sílice (40%), micas (45%) y partículas finas (15–25 μm). Estas condiciones generan un medio erosivo, especialmente en zonas de alta velocidad y turbulencia, como la descarga de los blindajes. Sumado a un bajo oxígeno disuelto y pH neutro, el entorno favorece la cavitación, lo cual explica el deterioro prematuro observado en las superficies metálicas del sistema hidráulico.

4.3 Información histórica de mantenimiento y fallas

Con el fin de identificar y clasificar los factores que influyen en el desgaste de los blindajes de las turbinas de la Central Hidroeléctrica Palmas, se desarrolló una base de datos en Microsoft Excel, en la cual se consolidó la información histórica de mantenimiento y fallas de las unidades generadoras en los últimos 5 años, durante el periodo 2020–2024.

Clasificación de eventos

Cada evento fue revisado y clasificado con base en su origen:

Fallas reales (correctivas internas): fugas en sellos, vibraciones, fallas del regulador, sobrecalentamiento del pivote o problemas eléctricos internos.

Indisponibilidades externas: bajo caudal del río Lebrija, taponamiento de rejas, disparos de líneas 413–414, o restricciones del despacho eléctrico. Para los casos en que un mismo evento afectó varias unidades (por ejemplo, la falla del rastrillo principal), se contabilizó una falla única a nivel de planta, pero se registraron las horas de indisponibilidad por unidad, reflejando correctamente el impacto operativo.

Mantenimientos programados: limpiezas preventivas, inspecciones, ajustes de válvulas o pruebas funcionales.

4.3.1 Resultados obtenidos

La siguiente tabla presenta los principales indicadores de desempeño de las unidades generadoras de la Central Hidroeléctrica Palmas en el periodo 2020–2024. Incluye tanto los indicadores mencionados anteriormente.

Tabla 5.*Resumen últimos 5 años mantenimiento de la PCH Palmas*

RESUMEN ULTIMOS 5 AÑOS							
# Unidad	Disponibilidad Total	Disponibilidad Operativa	Disponibilidad Intrínseca	Tasa de salida forzada por fallas	Tiempo medio entre fallas MTBF	Tasa de falla	Tiempo medio de reparación MITR
Unidad 1	0,4317	0,5105	0,9096	0,0904	788,79	0,0013	78,3750
Unidad 2	0,4581	0,6069	0,7337	0,2663	913,05	0,0011	331,4545
Unidad 3	0,5002	0,6173	0,8610	0,1390	812,33	0,0012	131,1111
Unidad 4	0,1895	0,1939	0,2274	0,7726	1662,00	0,0006	5647,2000
TOTAL PLANTA	0,3949	0,4662	0,6284	0,3716	887,96	0,0011	524,9872

Nota. La tabla presenta el resumen de los indicadores calculados para la PCH Palmas.

La disponibilidad total promedio de la planta (39,49%) y la disponibilidad operativa de la planta (46,62%) se encuentra por debajo del valor esperado (75%), según el informe de NERC². En este informe se reporta un promedio de disponibilidad para unidades con eventos del 75 %, lo que evidencia la incidencia de condiciones externas como bajo caudal y sedimentación, además de fallas recurrentes en los sistemas mecánicos y eléctricos.

La disponibilidad intrínseca en las unidades en operación se mantiene por encima del 80%, indicando un buen nivel de confiabilidad técnica, pero el valor global de la planta (62,84%) se ve reducido por la larga indisponibilidad de la Unidad 4, lo cual refleja la importancia de abordar las fallas mayores que afectan el conjunto del sistema.

Luego, la tasa de salida forzada (FOR), al indicar la proporción del tiempo en que la unidad esta fuera de servicio por eventos no programados, muestra que la unidad 1 es la más estable al

² NERC (2024). Generating Unit Statistical Brochure 1 2024 – Units Reporting Events. North American Electric Reliability Corporation (GADS).

tener solo un 9% en este valor. Las unidades 2 y 3 alcanzan valores más altos (26% y 13%), asociados a fallas en sistemas eléctricos y mecánicos, como en el generador o las altas vibraciones.

Los valores de MTBF obtenidos para las unidades 1 a 3 oscilan entre 789 h y 913 h, mientras que la unidad 4 presenta un valor aparente de 1662 h, el cual no es representativo por encontrarse fuera de servicio desde 2021. El promedio global de planta, de aproximadamente 888 horas, equivale a una falla cada 37 días de operación continua.

La tasa de falla (λ) indica la frecuencia con la que ocurren fallas por hora de operación, siendo entonces el inverso del MTBF. Entre las unidades activas, la unidad 1 presentó una tasa ligeramente superior, lo que se relaciona con fallas repetitivas en sistemas de sellado, vibraciones altas y regulación hidráulica. Para la unidad 3 también se tiene una tasa de falla mayor al promedio de la planta, siendo esto porque presentó bastantes fallas en el generador y paradas por altas vibraciones.

Finalmente, el MTTR expresa el tiempo promedio requerido para reparar una falla y devolver la unidad al servicio. Los resultados evidencian tiempos de reparación comprendidos entre 78 horas y 331 horas, entre las unidades 1, 2 y 3, con un promedio general de 525 h al incluir la unidad 4, cuyo valor de 5647 horas refleja una falla mayor no resuelta. Si se consideran únicamente las unidades operativas, el MTTR promedio real es de aproximadamente 174 horas, lo que demuestra una adecuada capacidad de respuesta frente a las fallas.

4.3.2 Fallas mayores PCH Palmas

Luego de clasificar las fallas, y contabilizarlas en horas totales a lo largo de los últimos 5 años se realizó la siguiente tabla.

Tabla 6.

Resumen fallas mayores últimos 5 años de la PCH Palmas.

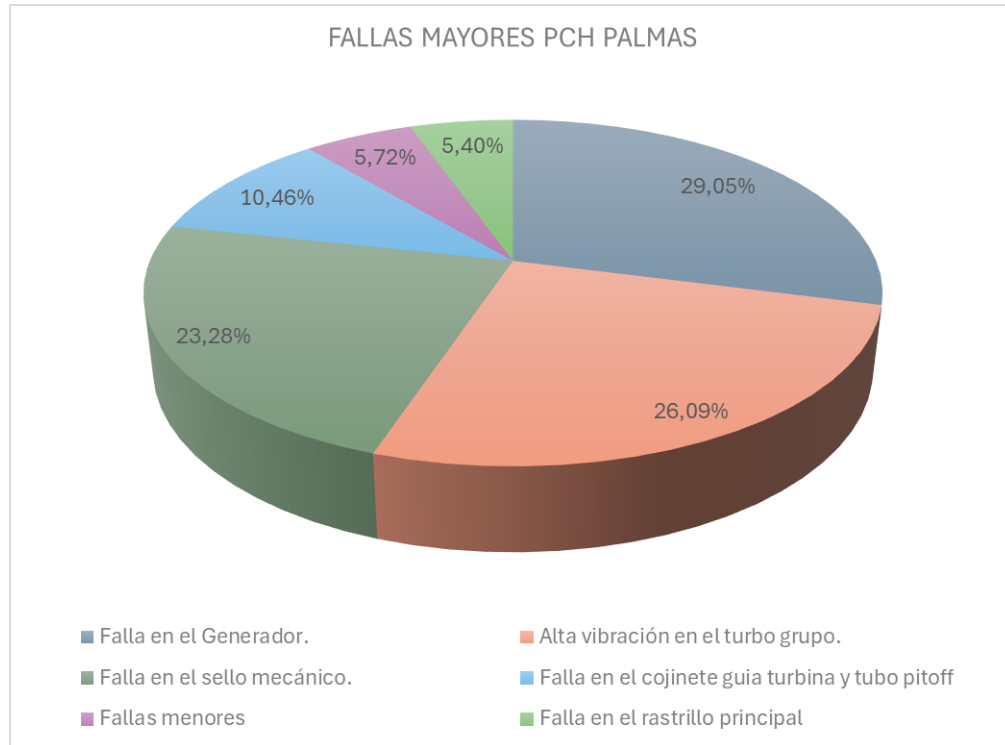
FALLAS MAYORES PCH PALMAS	
DESCRIPCIÓN	DURACION (HORAS)
Ruptura del caracol.	31298
Falla en el Generador.	3811
Alta vibración en el turbo grupo.	3423
Falla en el sello mecánico.	3054
Falla en el cojinete guía turbina y tubo pitoff	1372
Fallas menores	750
Falla en el rastrillo principal	709
Total	44417

Nota. La tabla presenta las fallas y sus horas totales.

Gracias a esta tabla se tiene el siguiente diagrama circular con los porcentajes que ocupa cada falla mayor con respecto al total de horas de falla. El predominio de la falla correspondiente a la ruptura del caracol (70,46 %) evidencia la criticidad de los mecanismos de desgaste hidráulico en la PCH Palmas. Esta condición está directamente relacionada a fenómenos de erosión y cavitación, que poco a poco van debilitando las piezas presentes en la planta. Debido a que la falla de la ruptura del caracol de la unidad 4 hace que los otros datos sean menores, se realizó el gráfico excluyendo este valor.

Figura 7.

Diagrama circular fallas PCH Palmas, sin falla del caracol de la U4.



Nota. En el gráfico se ven las mayores causas de falla en la PCH Palmas.

El gráfico evidencia que las fallas más recurrentes en la PCH Palmas están directamente asociadas a fenómenos de vibración y desgaste de los componentes hidráulicos de las turbinas Francis, principalmente de los blindajes de las turbinas.

Las fallas más representativas en la Central Hidroeléctrica Palmas se concentran en eventos de carácter mecánico y dinámico. Las fallas en el generador (29,05 %), aunque de naturaleza eléctrica, estuvieron asociadas indirectamente a la transmisión de vibraciones desde la turbina, situación que fue corregida por la empresa en 2025. La alta vibración en las unidades (26,09 %) continúa siendo un evento recurrente y se asocia a la pérdida de recubrimiento por erosión y cavitación en los blindajes, generando asimetrías hidráulicas que se reflejan principalmente en los cojinetes 3 y 4. Otras fallas, como las de sellos mecánicos, cojinete guía y tubo Pitot, fueron mitigadas mediante mejoras de diseño e intervenciones correctivas implementadas entre 2022 y

2025, logrando reducir tiempos de reparación y estabilizar la operación. Las fallas del rastrillo principal, que afectaban la disponibilidad por paradas simultáneas, motivaron la instalación de un nuevo sistema de mayor capacidad en 2025. Finalmente, las fallas menores correspondieron a eventos de corta duración sin impacto significativo en el desempeño global de la planta.

4.3.3 Estado actual de los blindajes de las turbinas de la PCH Palmas

Se recopilaron las siguientes fotos de los blindajes de turbina del último mantenimiento de la PCH Palmas

Figura 8.

Estado actual de los blindajes de las turbinas.



Nota. Fotos tomadas del último mantenimiento mayor. Tomada de ESSA (2025)

La superficie presenta surcos y pérdida de material asociados a desgaste por erosión, junto con daños localizados en la línea de unión, que podrían estar relacionados con turbulencia o cavitación. También se distinguen manchas de oxidación superficial en las áreas ya desgastadas.

Figura 9.

Estado actual de los blindajes de las turbinas.



Nota. Fotos tomadas del último mantenimiento mayor. Tomada de ESSA (2025)

Se observan también picaduras y cavidades irregulares, indicativas de daño localizado por cavitación en combinación con la erosión. Las áreas brillantes muestran exposición del metal base y las manchas marrón-rojizas corresponden a oxidación superficial. En la segunda imagen se aprecia una fisura longitudinal en el blindaje, ubicada cerca de la línea de perforaciones. La superficie alrededor muestra desgaste erosivo generalizado. La presencia de la fisura indica fatiga o debilitamiento del material debido a la combinación de erosión continua con esfuerzos mecánicos y vibraciones.

Figura 10.

Estado actual de los blindajes de las turbinas.



Nota. Fotos tomadas del último mantenimiento mayor. Tomada de ESSA (2025)

En conjunto, la evidencia visual indica que el blindaje presenta un deterioro crítico con perforación visible, resultado de diferentes tipos de desgaste, como cavitación y erosión. Este nivel de daño compromete la integridad de la pieza y exige reemplazo o reparación inmediata.

El diagnóstico realizado en este primer objetivo permitió comprender con precisión las condiciones actuales de operación y mantenimiento de la Central Hidroeléctrica Palmas, así como el comportamiento mecánico e hidráulico de sus unidades de generación. Los datos analizados, junto con las observaciones visuales de los blindajes, revelan que el desgaste presente es un fenómeno importante que afecta de forma directa a la planta de trabajo y a su correcto funcionamiento.

Las imágenes e inspecciones presentadas al final de este capítulo muestran de manera directa el estado real de los blindajes, evidenciando pérdida de material, rugosidad superficial, zonas erosionadas y patrones de deterioro que no pueden explicarse únicamente mediante el análisis descriptivo de desempeño. Si bien este rápido diagnóstico aporta una línea base clara sobre qué está ocurriendo en las unidades, no permite establecer con certeza “por qué ocurre”. Por esta razón, el siguiente paso lógico y es la aplicación de un Análisis de Causa Raíz (ACR).

En síntesis, mientras el Objetivo 1 permitió reconstruir el contexto operacional y evidenciar el problema, el Objetivo 2 se orienta a entenderlo en profundidad, identificando las causas que lo generan y que condicionan la vida útil de los blindajes. De esta forma, se establece un puente lógico y metodológico entre la observación del estado actual y el análisis técnico que permitirá desarrollar soluciones fundamentadas para mejorar la sostenibilidad y desempeño de la planta.

5. Análisis Causa Raíz

El desgaste prematuro de los blindajes de las turbinas Francis de la PCH Palmas se ha convertido en un evento recurrente que afecta directamente la disponibilidad y confiabilidad de la central. Aunque, según la empresa, estos componentes están diseñados para operar hasta 18.000 horas, las intervenciones reales se presentan entre 14.000 y 16.000 horas, evidenciando una desviación significativa entre el desempeño esperado y el comportamiento observado. A partir de la inspección visual, registros operativos, documentación técnica y del análisis sedimentológico del río Lebrija, se determinó que el problema no podía ser explicado únicamente desde el mecanismo físico del desgaste.

5.1 Análisis y Reporte de la falla

La hoja de clasificación del evento permite evaluar la criticidad del desgaste prematuro de los blindajes considerando tanto sus consecuencias operativas como la frecuencia con la que ocurre. En primer lugar, se analizan las afectaciones potenciales en cinco dimensiones: personas, ambiente, costo–recurso financiero, calidad y reputación.

Figura 11.

Formato de clasificación del evento.

Consecuencias	Clasificación	Descripción y/u observación
Personas	Mínima	No se evidencian riesgos directos a la seguridad del persona
Ambiente	Mínima	No hay vertimientos ni impactos ambientales asociados; el fenómeno ocurre dentro del circuito hidráulico cerrado.
Costo / Recurso Financiero	Moderada	Aumento del costo por repuestos y mano de obra. Incremento de paradas no programadas; pérdida de ingresos por indisponibilidad.
Calidad	Moderada	La eficiencia hidráulica de la unidad disminuye, reduciendo la calidad del servicio de generación.
Reputación	Menor	Afecta indicadores internos de ESSA (disponibilidad y confiabilidad)

Frecuencia	Alta	Ocurre cada ciclo de mantenimiento con recurrencia
------------	------	--

		CONSECUENCIA				
		Mínima	Menor	Moderada	Mayor	Máxima
		1	2	4	8	16
FRECUENCIA	Marca "X"			X		
Muy Alta	5	5	10	20	40	80
Alta	4	X	4	8	16	32
Media	3		3	6	12	24
Baja	2		2	4	8	16
Muy Baja	1		1	2	4	8

Resultado de la clasificación del evento:	
Índice de riesgo	16
Nivel de riesgo	Alto
Categoría del escenario	3

Árbol causal

Definición del problema
Se presentó un desgaste prematuro en los blindajes superior e inferior de una turbina Francis vertical. El escenario se manifestó por aumento de vibraciones, inestabilidad en la operación de la unidad y confirmación visual de pérdida de material en inspección interna. El evento se produjo durante la operación normal de la unidad generadora, después de aproximadamente 14 000–16 000 horas de servicio, dentro de la casa de máquinas de la central, la cual trabaja con agua proveniente del río Lebrija. El impacto para la organización es la necesidad de sacar la unidad de servicio antes del tiempo programado de mantenimiento (18 000 horas), generando una parada no programada, consumo anticipado de repuestos y afectación de la disponibilidad y confiabilidad de la generación. Esto a su vez impacta los procesos de operación y mantenimiento de la planta, y la continuidad del servicio prestado. Este evento se ha presentado anteriormente en otras unidades de la central y tiene carácter recurrente. Los procesos afectados son operación y mantenimiento de las unidades hidráulicas; no se evidenció afectación directa sobre personas, medio ambiente ni sobre sistemas de información corporativos.

Señales o alarmas presentadas (si aplica)
Durante el monitoreo se registraron incrementos en los niveles de vibración en los puntos de control del cojinete y la carcasa de la turbina. También se escucharon ruidos anómalos en la zona del blindaje. Estas señales activaron la alarma operativa y motivaron la inspección visual interna, donde se confirmó la presencia de desgaste y pérdida de material en los blindajes superior e inferior.

Acciones inmediatas que se ejecutaron
Se realizó la parada controlada de la unidad afectada para evitar daños mayores. Posteriormente, se efectuó una inspección interna del conjunto turbina–generador, confirmando el desgaste en los blindajes. La unidad entró en mantenimiento

Nota. Matriz de criticidad del evento por desgaste.

Aunque el evento no genera riesgos directos para el personal ni impactos ambientales significativos, sí ocasiona consecuencias moderadas a nivel financiero y de calidad del servicio, debido a intervenciones anticipadas, costos de repuestos y paradas de la unidad que afectan la disponibilidad de la central. El desgaste de los blindajes ocurre entre 14.000 y 16.000 horas de operación, frente a un valor esperado de 18.000 horas, lo que corresponde a una frecuencia alta dentro del sistema. La combinación de una consecuencia moderada con una frecuencia alta ubica el evento en un nivel de riesgo Alto, justificando la aplicación de un Análisis de Causa Raíz.

El problema se define como un desgaste prematuro del blindaje, evidenciado por pérdida de material, surcos y cavidades observadas durante las inspecciones internas, lo que deriva en un incremento progresivo de las vibraciones y una disminución del desempeño hidráulico. Previo a la intervención se registraron niveles elevados de vibración en los cojinetes, superando los valores normales de operación, lo que motivó la detención de la unidad y la ejecución de acciones correctivas para evitar daños mayores.

5.2 Evidencias recolectadas

La recolección de evidencias para el presente análisis de causa raíz se realizó mediante un proceso sistemático que integró fuentes técnicas, operativas y documentales asociados directamente al funcionamiento de las turbinas de la PCH Palmas. Se utilizaron registros históricos de operación, tales como velocidades de rotación, mediciones de vibración RMS en los cojinetes críticos y fotografías e inspecciones visuales del estado real de los blindajes. Asimismo, se consultaron los manuales de operación y mantenimiento institucionales, la especificación técnica del fabricante y la normativa ISO aplicable, con el fin de contrastar el comportamiento observado con los parámetros de diseño y los límites operativos establecidos. Finalmente, se incorporó el

análisis fisicoquímico y sedimentológico del agua del río Lebrija y de los sedimentos presentes en las conducciones, lo cual permitió identificar las características del entorno hidráulico que influyen en los mecanismos de desgaste. Estas evidencias permitieron construir una base sólida y verificable para el desarrollo del árbol causal y la validación de las hipótesis del estudio.

Tabla 7.

Evidencias recolectadas.

No.	Nombre de la evidencia	Descripción de la evidencia
1	Manual de operación MPSGI004	Documento institucional que establece los parámetros operativos, rangos de funcionamiento y protocolos de control para la Central Hidroeléctrica Palmas. Define específicamente el caudal de diseño por unidad (3,5 m ³ /s para turbinas tipo Francis), los límites seguros de operación, procedimientos de arranque/parada, y las competencias requeridas del personal. Sirve como referencia para verificar desviaciones operativas que puedan influir en el desgaste de componentes.
2	Registros de velocidad de rotación (RPM)	Datos históricos de velocidad angular de las unidades generadoras U1, U2 y U3, recolectados de manera continua entre 2020 y 2024. Permiten contrastar las condiciones reales de operación con el valor nominal de diseño (720 rpm).
3	Especificación técnica del fabricante	Documento en el cual se definen las condiciones de diseño como velocidad nominal, caudal hidráulico, tipo de montaje y materiales recomendados. Permite contrastar el entorno operativo real con los límites constructivos para evaluar sobrecargas o mal uso.
4	Registros de vibraciones RMS (mm/s) en cojinetes 3 y 4 de U1, U2, U3	Historial técnico de medición de vibraciones en los ejes y soportes críticos de las unidades generadoras, usando valores RMS (Root Mean Square) para los ejes horizontal, vertical y axial.
5	Norma ISO 20816-5	Historial técnico de medición de vibraciones en los ejes y soportes críticos de las unidades generadoras, usando valores RMS (Root Mean Square) para los ejes horizontal, vertical y axial.
6	Manual de mantenimiento MPSGI002	Procedimiento oficial que detalla las rutinas de mantenimiento preventivo, correctivo y predictivo aplicables a los equipos principales de la central. Define responsabilidades, frecuencias, registros y protocolos asociados a tareas clave como inspección de blindajes, limpieza de sedimentos, y evaluación de condiciones operativas.
7	Fotografías e inspecciones visuales documentadas	Conjunto de registros gráficos y descripciones técnicas realizadas durante las inspecciones programadas y correctivas. Incluyen evidencia visual del estado de los blindajes, zonas de daño recurrente, patrones de desgaste y condiciones generales de los componentes.
8	Servicio De Análisis Físico Químico Y Caracterización De Sedimentos Presentes En La Conducción Y Fosos De Turbina De Las Unidades De Generación - PCH Palmas	Informe técnico resultante del servicio especializado de laboratorio contratado para evaluar las propiedades físico-químicas del agua del río Lebrija y los sedimentos presentes en la conducción y fosos de turbina. Incluye datos sobre granulometría, carga mineral, pH, sólidos en suspensión, entre otros. Es fundamental para sustentar la hipótesis sobre erosión abrasiva como causa principal del desgaste.

Nota. Se presentan las diferentes evidencias recolectadas para el RCA.

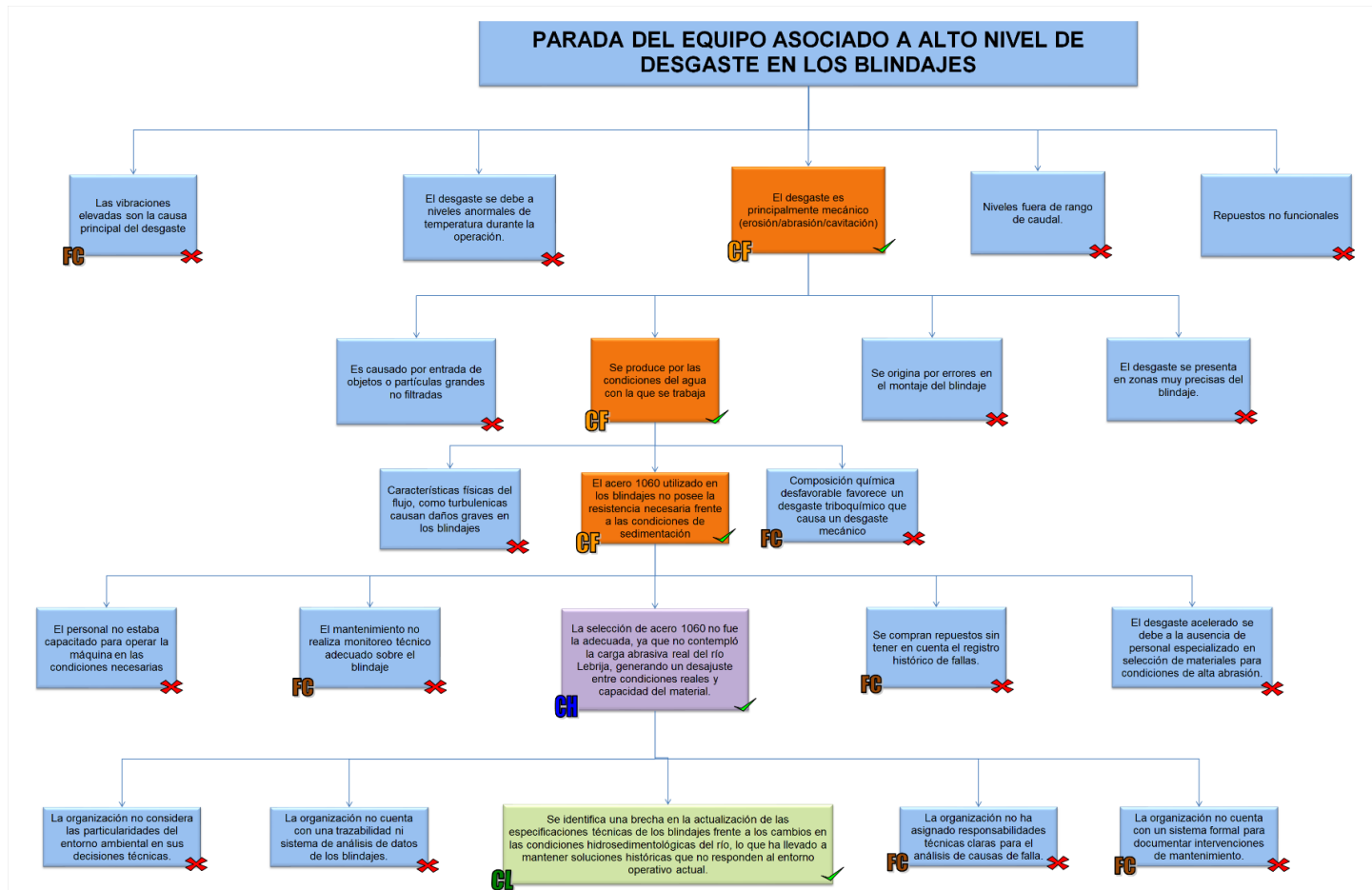
5.3 Árbol causal

Con el fin de comprender de manera integral el origen del desgaste prematuro en los blindajes de las turbinas Francis de la PCH Palmas, se elaboró un árbol causal que organiza de forma jerárquica las hipótesis físicas, humanas y latentes identificadas durante el análisis. Esta herramienta permitió estructurar la relación entre el fenómeno observado, la pérdida acelerada de espesor en los blindajes, y las condiciones operativas, de diseño y de gestión que influyen en su ocurrencia.

La construcción del árbol se realizó a partir de la información recopilada durante el diagnóstico, incluyendo registros históricos de operación y mantenimiento, evidencias de desgaste en los componentes y el análisis del entorno hidráulico y sedimentológico del río Lebrija. De esta manera, el árbol causal permite visualizar no solo el mecanismo físico del daño, sino también la secuencia de causas que explican su recurrencia, facilitando la identificación de la causa raíz y orientando las acciones correctivas.

Figura 12.

Árbol causal.



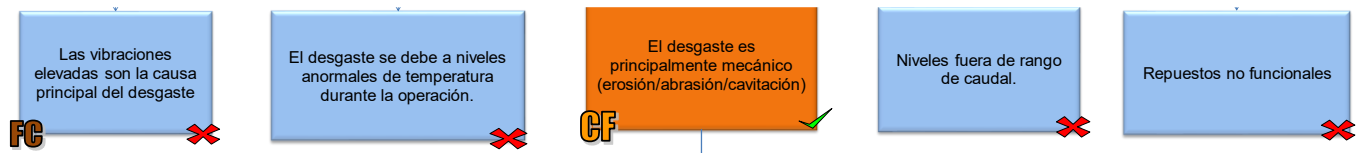
Nota. Árbol causal con Causas Físicas, Causas Humanas, Causas Latentes y factores contribuyentes.

5.3.1 Primera línea de hipótesis

En esta primera línea se evaluaron causas físicas que pueden haber causado la falla

Figura 13.

Primera Línea de Hipótesis



Nota. Primera línea de causas físicas.

Se evaluaron variables operacionales como vibraciones, temperatura, caudal y calidad de repuestos, contrastándolas con datos reales de operación y mediciones en planta. Estas condiciones fueron descartadas al evidenciarse que permanecían dentro de rangos normales y no guardaban relación directa con el fenómeno observado. El análisis permitió establecer que el desgaste tiene un origen predominantemente mecánico, asociado a la erosión y abrasión producida por los sedimentos transportados por el flujo hidráulico. A continuación, se presenta el proceso de verificación de hipótesis que sustentó esta conclusión.

Figura 14.

Verificación de la primera línea de hipótesis.

No.	Hipótesis Generadas	Descripción de la Hipótesis	Acción de Verificación	Responsable verificación de hipótesis	Argumento y/o comentario resultado de la verificación	Argumento y/o comentario resultado de la verificación
1	Las vibraciones elevadas son la causa principal del desgaste	Se propuso inicialmente que las cuatro unidades de generación podrían presentar niveles elevados de vibración como consecuencia directa del desgaste de los blindajes y de otros componentes hidráulicos, lo que afectaría la estabilidad mecánica y la eficiencia operativa de la central.	Se analizaron los registros de vibración horizontal (H), vertical (V) y axial (A) obtenidos de los cojinetes 3 y 4 de las unidades 1, 2 y 3 durante el periodo 2020–2024, comparando los valores RMS (mm/s) con los límites establecidos por la norma ISO 20816-5 para máquinas de montaje rígido tipo Francis	Santiago Ramírez Jones	Los resultados mostraron que solo la Unidad 3 presentó niveles de vibración cercanos o superiores al límite de alerta, especialmente en el cojinete 3, mientras que las unidades 1 y 2 mantuvieron valores dentro del rango normal. No se evidenció un patrón uniforme de vibraciones altas en todas las unidades asociado directamente al desgaste de los blindajes. Por tanto, se descarta la hipótesis, concluyéndose que las vibraciones elevadas no afectan por igual a todas las unidades.	Hipótesis Descartada
2	El desgaste se debe a niveles anormales de temperatura durante la operación.	Esta hipótesis plantea que el desgaste acelerado en los blindajes podría ser causado por un aumento significativo de temperatura en zonas cercanas a la turbina, lo cual podría alterar las propiedades mecánicas del material o favorecer procesos de degradación térmica.	Revisión de registros históricos de temperatura desde 2020 hasta 2024, especialmente en zonas cercanas al blindaje.	Santiago Ramírez Jones	Los registros de temperatura son consistentes con rangos normales durante toda la operación. No se reportan eventos térmicos anómalos ni alertas fuera de especificación. Además, el tipo de daño observado (desgaste localizado, pérdida de espesor, cavitación) no corresponde con degradación térmica.	Hipótesis Descartada
3	El desgaste es principalmente mecánico (erosión/abrasión/cavitación)	Esta hipótesis plantea que el principal mecanismo de daño observado en los blindajes corresponde a procesos de desgaste mecánico: erosión, abrasión y cavitación.	Análisis visual del tipo de daño en los blindajes (fotografías y reportes de inspección).	Santiago Ramírez Jones	Los reportes fotográficos muestran desgaste localizado en zonas directamente expuestas al flujo. No se observan signos de corrosión química ni efectos térmicos. El análisis del agua confirma alta carga de sedimentos abrasivos y el tipo de desgaste es coherente con erosión hidráulica y cavitación.	Hipótesis Validada
4	Niveles fuera de rango de caudal.	Se evaluó la posibilidad de que el caudal de operación se haya mantenido fuera del BEP hidráulico.	Analizar la planta para saber si presenta planes en caso de cambios de caudal, además de revisión los registros históricos de caudal y generación (2020–2024) junto con los datos operativos del Manual de Operación MPSGI004, comparando los valores promedio de caudal por unidad con el rango de diseño hidráulico (3,5 m³/s) establecido para las turbinas Francis de la Central Palmas.	Santiago Ramírez Jones	La planta presenta compuertas y válvulas que permiten una regulación eficaz del flujo que evita estos eventos inesperados. Los registros operativos evidencian que los caudales del río Lebrija se han mantenido dentro del rango establecido para la operación nominal de las turbinas.	Hipótesis Descartada
5	Repuestos no funcionales	Se plantea que los blindajes instalados como repuestos podrían haber presentado defectos de fabricación, errores dimensionales o especificaciones distintas a las requeridas, lo cual habría provocado una reducción en su desempeño y vida útil desde el inicio.	Revisión de metrologías y registro histórico de uso de los repuestos.	Santiago Ramírez Jones	Aunque no se encuentre una trazabilidad acerca de estos factores, la empresa cuenta con personal técnico encargado de metrologías a todos los repuestos, además, la empresa afirma que históricamente se usan esos repuestos, pero que en los últimos años han presentado más esta falla.	Hipótesis Descartada

Nota. Se realizó la verificación de la primera línea de causas físicas.

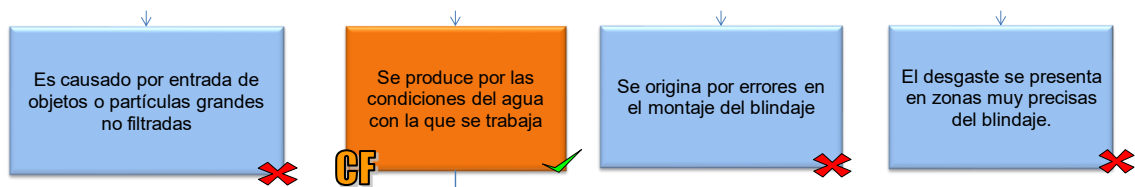
Para cada hipótesis se definieron acciones de verificación basadas en registros históricos, mediciones en campo, inspecciones visuales y revisión documental. Los resultados permitieron descartar variables operacionales como vibraciones, temperatura, caudal y calidad de repuestos al no evidenciar relación directa con el fenómeno observado. Finalmente, se validó que el desgaste responde principalmente a mecanismos mecánicos de erosión y cavitación asociados a los sedimentos presentes en el agua del río Lebrija.

5.3.2 Segunda fila de hipótesis

En esta sección se evaluaron en segunda instancia causas físicas que pueden haber desencadenado en la hipótesis validada en el punto anterior.

Figura 15.

Segunda línea de hipótesis.



Nota. Segunda línea de causas físicas.

Se descartaron causas asociadas a partículas de gran tamaño, errores de montaje y localización puntual del daño. El análisis permitió concluir que el fenómeno está directamente relacionado con las condiciones del agua y la carga de sedimentos presentes durante la operación. A continuación, se presenta el proceso de verificación de hipótesis que sustentó esta conclusión.

Figura 16.

Segunda fila de hipótesis.

No.	Hipótesis Generadas	Descripción de la Hipótesis	Acción de Verificación	Responsable verificación de hipótesis	Argumento y/o comentario resultado de la verificación	Argumento y/o comentario resultado de la verificación
6	Es causado por entrada de objetos o partículas grandes no filtradas	Esta hipótesis sugiere que el desgaste en los blindajes se debe al impacto o arrastre de cuerpos extraños de gran tamaño (ramas, piedras grandes, basura u otros sólidos no capturados por el sistema de filtrado del canal).	Se revisaron los reportes de inspección post-parada de mantenimiento, así como registros fotográficos de daños en blindajes. Además, se evaluó el estado y frecuencia de mantenimiento de los sistemas de rejillas y desarenadores.	Santiago Ramírez Jones	No se halló evidencia de daño localizado ni cortes asociados al paso de sólidos de gran tamaño. El desgaste observado es progresivo, continuo y concentrado en zonas expuestas al flujo constante. Los sistemas de rejillas operan con mantenimiento periódico y además se modernizó el sistema.	Hipótesis Descartada
7	Se produce por las condiciones del agua con la que se trabaja	Esta hipótesis específica que el medio fluido (agua del Río Lebrija) contiene condiciones fisicoquímicas que potencian el desgaste mecánico	Revisión de informes de análisis físico-químico y sedimentológico del agua (2020–2024).	Santiago Ramírez Jones	Los informes técnicos de análisis del agua muestran presencia confirmada de materiales abrasivos, incluyendo cuarzo y minerales duros, que están científicamente asociados a procesos de erosión y desgaste superficial en contacto con acero, confirmándose como causa del desgaste que se presenta.	Hipótesis Validada
8	Se origina por errores en el montaje del blindaje	Esta hipótesis plantea que el desgaste acelerado observado en los blindajes puede deberse a por errores en el montaje.	Revisión de los manuales de mantenimiento donde se tenga establecido de forma clara la forma de alinear y realizar un montaje correcto de estas piezas.	Santiago Ramírez Jones	El tipo de daño observado (pérdida de espesor, zonas expuestas y concentradas) es coherente con daño por interacción con flujo abrasivo.	Hipótesis Descartada
9	El desgaste se presenta en zonas muy precisas del blindaje.	Se evaluó la posibilidad de que el desgaste acelerado observado en los blindajes no sea generalizado, sino que se concentre en zonas específicas. Esta hipótesis sugeriría que factores locales, como turbulencias estructurales, errores de instalación, cavitación localizada o deficiencias puntuales del material.	Se analizaron registros fotográficos, informes de inspección visual durante mantenimientos programados y correctivos entre 2020 y 2024. Se revisaron las ubicaciones de daño, la distribución espacial del desgaste y la reincidencia por zonas.	Santiago Ramírez Jones	La evidencia muestra que el desgaste no está confinado a zonas específicas del blindaje. Aunque existen áreas donde el daño es más visible, el patrón se repite con relativa homogeneidad en distintas unidades y con diferentes condiciones operativas. Esto indica que el fenómeno no responde a una condición localizada, sino a un mecanismo de desgaste global y repetitivo, compatible con un entorno abrasivo generalizado y no con una falla puntual.	Hipótesis Descartada

Nota. Se realizó la verificación de la segunda línea de causas físicas.

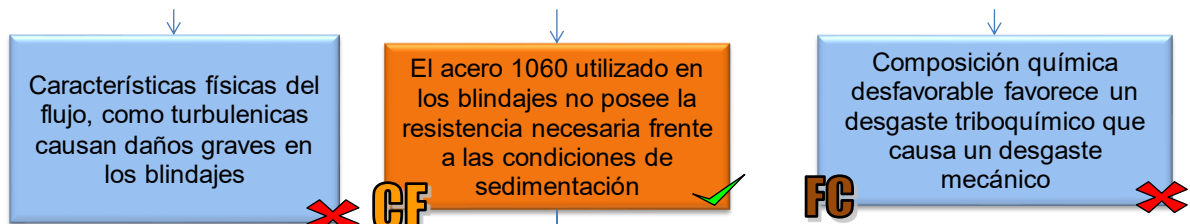
Se presenta la segunda fase del proceso de verificación de hipótesis dentro del RCA, enfocada en posibles causas externas y de montaje asociadas al desgaste de los blindajes. Mediante revisión de reportes de mantenimiento, análisis del agua y sedimentos, inspecciones visuales y revisión documental, se descartaron hipótesis. Los resultados confirmaron que el patrón de desgaste es coherente con la interacción continua entre el material y el flujo con alta carga de sedimentos. De esta manera, se validó que las condiciones fisico-químicas del agua constituyen el factor determinante del mecanismo de desgaste observado.

5.3.3 Tercera fila de hipótesis

En esta fila se buscó causas físicas que pueden haber sido causantes de la hipótesis validada en el punto anterior.

Figura 17.

Tercera línea de hipótesis.



Nota. Tercera línea de causas físicas.

En la imagen se tiene el análisis final de hipótesis relacionadas con el origen del desgaste en función del material y las condiciones del flujo, estableciendo que el factor determinante es la insuficiente resistencia del acero SAE 1060 frente a la carga de sedimentos presente en la operación. A continuación, se presenta el proceso de verificación de hipótesis que sustentó esta conclusión.

Figura 18.

Tercera fila de hipótesis.

No.	Hipótesis Generadas	Descripción de la Hipótesis	Acción de Verificación	Responsable verificación de hipótesis	Argumento y/o comentario resultado de la verificación	Argumento y/o comentario resultado de la verificación
10	Características físicas del flujo, como turbulencias causan daños graves en los blindajes	Esta hipótesis plantea que el flujo de agua dentro del sistema hidráulico presenta condiciones anómalas como turbulencias intensas, zonas de recirculación o choques hidráulicos, que podrían estar generando daño localizado sobre los blindajes, afectando su integridad.	Revisión de los reportes de operación y registros de caudal y RPM para identificar condiciones fuera de diseño. Evaluación de posibles eventos hidráulicos anómalos registrados en actas o reportes técnicos. Análisis de inspecciones visuales y distribución del daño en blindajes.	Santiago Ramirez Jones	No se reportan modificaciones estructurales, cambios de geometría ni eventos hidráulicos que hayan afectado el comportamiento del flujo. Además, la distribución del desgaste está asociada a zonas de contacto directo con sedimentos, no a trayectorias erráticas del flujo.	Hipótesis Descartada
11	El acero 1060 utilizado en los blindajes no posee la resistencia necesaria frente a las condiciones de sedimentación	Se evaluó la posibilidad de que el desgaste acelerado observado en los blindajes no sea generalizado, sino que se concentre en zonas específicas. Esta hipótesis sugeriría que factores locales, como turbulencias estructurales, errores de instalación, cavitación localizada o deficiencias puntuales del material.	Se analizaron registros fotográficos, informes de inspección visual y mapeos realizados durante mantenimientos programados y correctivos entre 2020 y 2024. Se revisaron las ubicaciones de daño, la distribución espacial del desgaste y la reincidencia por zonas.	Santiago Ramirez Jones	El acero 1060 no es un material diseñado para resistir ambientes de abrasión severa. Su resistencia al desgaste es limitada frente a materiales como aceros de alta aleación, inoxidable o recubiertos. El patrón de falla observado y la rápida recurrencia del daño indican que el material no responde adecuadamente al entorno operativo. Por tanto, esta hipótesis se valida como causa técnica principal dentro del mecanismo de desgaste.	Hipótesis Validada
12	Composición química desfavorable favorece un desgaste triboquímico que causa un desgaste mecánico	Esta hipótesis sugiere que el agua contiene compuestos químicos agresivos que pueden reaccionar con la superficie metálica del blindaje, generando un proceso triboquímico o corrosivo que acelere o potencie el desgaste mecánico.	Revisión del informe técnico "Análisis físico-químico y caracterización de sedimentos – PCH Palmas". Análisis visual de daños por medio de fotografías de los blindajes.	Santiago Ramirez Jones	El análisis químico del agua muestra que los niveles de pH son neutros (6.9–7.2) y no se identifican concentraciones significativas de cloruros, sulfatos ni otros compuestos agresivos. No hay agentes químicos presentes que puedan iniciar o sostener reacciones triboquímicas. Las fotografías de los blindajes no muestran ningún patrón de daño químico: no hay picaduras profundas, zonas con oxidación localizada ni desprendimientos por corrosión. En cambio, se observa pérdida progresiva y uniforme de espesor, característica típica de erosión y abrasión mecánica.	Hipótesis Descartada

Nota. Se realizó la verificación de la tercera línea de causas físicas.

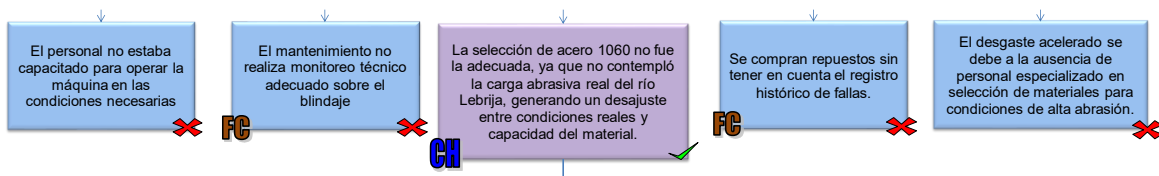
Se presenta la etapa final del proceso de verificación de hipótesis por causas físicas. A partir del análisis de reportes operativos, registros de inspección y caracterización fisicoquímica del agua, se permitió concluir que el acero SAE 1060 no posee la resistencia suficiente frente a las condiciones de sedimentación presentes en la operación, validando que la selección del material constituye la causa técnica principal del mecanismo de desgaste identificado.

5.3.4 Cuarta fila de hipótesis

En esta cuarta fila de hipótesis se evaluaron causas humanas que pueden haber causado la hipótesis validada en el punto anterior.

Figura 19.

Cuarta línea de hipótesis.



Nota. Línea de causas humanas.

La anterior figura presenta la etapa previa al cierre del análisis organizacional dentro del proceso de RCA, en la cual se evaluaron hipótesis asociadas a factores humanos, de mantenimiento y de gestión técnica. Se analizaron posibles deficiencias en capacitación, monitoreo y decisiones de compra, con el fin de determinar si el desgaste podía atribuirse a fallas operativas o administrativas. A continuación, se presenta el proceso de verificación de hipótesis que sustentó esta conclusión.

Figura 20.

Cuarta fila de hipótesis.

No.	Hipótesis Generadas	Descripción de la Hipótesis	Acción de Verificación	Responsable verificación de hipótesis	Argumento y/o comentario resultado de la verificación	Argumento y/o comentario resultado de la verificación
13	El personal no estaba capacitado para operar la máquina en las condiciones necesarias	Esta hipótesis sugiere que los daños observados en los blindajes podrían haber sido causados o agravados por fallas humanas durante la operación, debido a una falta de formación técnica adecuada del personal operativo.	Revisión del manual de operación MPSGI004, que establece responsabilidades, formación mínima requerida y protocolos de operación.	Santiago Ramírez Jones	La revisión del manual MPSGI004 confirma que el personal cumple con requisitos de capacitación técnica, trabaja bajo un régimen de turnos rotativos y se apega a protocolos definidos. Además, los datos históricos de operación muestran que los parámetros operativos (RPM, caudal) se han mantenido dentro del rango esperado. No hay evidencia de operación fuera de especificaciones ni de fallas atribuibles a errores humanos.	Hipótesis Descartada
14	El mantenimiento no realiza monitoreo técnico adecuado sobre el blindaje	Esta hipótesis plantea que la falta de monitoreo sistemático del estado de los blindajes (espesores, vibración local, temperatura estructural) impidió detectar a tiempo la recurrencia del daño y contribuyó a la falta de una respuesta preventiva. No implica que el mantenimiento haya causado el desgaste, sino que no fue capaz de anticiparlo ni caracterizarlo adecuadamente.	Revisión del manual de mantenimiento MPSGI002, para confirmar si se incluyen rutinas de monitoreo del blindaje. Revisión del plan de mantenimiento para verificar si contempla mediciones periódicas de espesor o inspecciones estructurales. Consulta de registros de vibración, temperatura y análisis de fallas, y si están vinculados a decisiones técnicas sobre los blindajes.	Santiago Ramírez Jones	Aunquela planta cuenta con mediciones de vibración y temperatura en zonas cercanas al blindaje, no existen registros de rutinas de medición de espesor. Tampoco se encontraron reportes técnicos que analizaran el desempeño del acero 1060 antes de su instalación o tras fallas repetidas. Aun así, si se midieran los espesores y se realizaran estudios, el desgaste seguiría al mismo ritmo, por lo que se tiene como factor contribuyente mas no como causa directa de la falla.	Hipótesis Descartada
15	La selección de acero 1060 no fue la adecuada, ya que no contempló la carga abrasiva real del río Lebríja, generando un desajuste entre condiciones reales y capacidad del material.	Esta hipótesis establece que el material seleccionado para la fabricación de los blindajes (acero 1060) no fue técnicamente adecuado para resistir el ambiente hidráulico de la central, especialmente por la presencia de sedimentos minerales abrasivos en el agua del río Lebríja. La selección no se basó en un análisis contextual de las condiciones del sitio, sino que se adoptó por costumbre o por prácticas previas.	Se revisaron las propiedades mecánicas y tribológicas del acero 1060, especialmente en ambientes con impacto de partículas sólidas. Se consultó el informe técnico de caracterización físico-química y sedimentológica del agua de la central, que identifica la presencia significativa de minerales abrasivos en suspensión. Se analizaron reportes fotográficos e inspecciones visuales del blindaje, donde se observa un patrón de desgaste progresivo, sin indicios de falla química o estructural interna.	Santiago Ramírez Jones	El acero 1060 no cuenta con resistencia mejorada frente a abrasión severa. No está aleado con elementos como Cr (cromo), Ni (níquel), Mo (molibdeno) ni recibe tratamientos superficiales específicos para erosión hidráulica. El informe sedimentológico confirma una alta carga de cuarzo y otros minerales duros que impactan directamente el blindaje. No hay evidencia de un proceso técnico de selección de material; por el contrario, el mantenimiento se limitó a reponer blindajes con el mismo acero, sin ajustar al entorno real. El desgaste observado es compatible con fallas por abrasión severa, no por defecto de fabricación, corrosión o mala operación.	Hipótesis Validada
16	Se compran repuestos sin tener en cuenta el registro histórico de fallas	Esta hipótesis plantea que las decisiones de compra de blindajes (repuestos) se han tomado sin considerar los antecedentes de fallas, recurrencia de desgaste ni lecciones aprendidas de intervenciones anteriores.	Revisión de si existen documentos técnicos de análisis de causa posteriores a fallas repetidas en blindajes. Evaluación de si se ha generado alguna retroalimentación técnica desde mantenimiento hacia compras.	Santiago Ramírez Jones	Los documentos revisados no muestran evidencia de que las compras de repuestos hayan considerado los patrones históricos de desgaste. La compra se ha limitado históricamente a reponer blindajes con acero 1060, pese a su repetida falla, sin ajustes. Aun así, esta no es considerada directamente como una causa raíz, sino como un factor contribuyente a la verdadera causa raíz	Hipótesis Descartada
17	El desgaste acelerado se debe a la ausencia de personal especializado en selección de materiales para condiciones de alta abrasión.	Esta hipótesis sugiere que el problema radica en que la organización no cuenta con ingenieros o técnicos con conocimientos en selección de materiales resistentes a erosión, abrasión o cavitación, por lo que el acero 1060 fue elegido sin una evaluación técnica adecuada de su comportamiento frente al ambiente hidráulico real.	Revisión de perfiles y funciones del personal técnico involucrado en especificaciones, mantenimiento y adquisición de blindajes.	Santiago Ramírez Jones	La organización cuenta con personal técnico certificado, con formación en áreas de ingeniería mecánica y experiencia en operación de centrales hidroeléctricas.	Hipótesis Descartada

Nota. Se realizó la verificación de la cuarta línea, sobre las causas humanas.

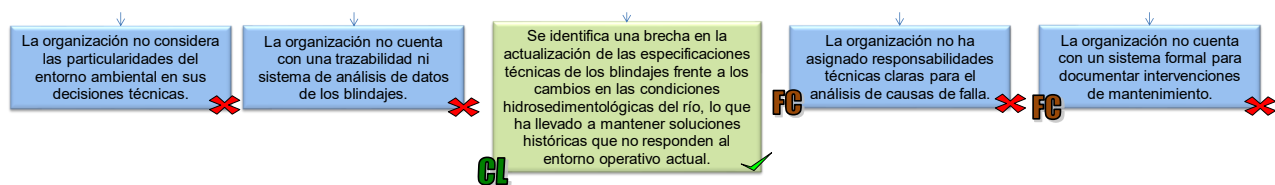
Se presentan los posibles factores humanos asociados al desgaste de los blindajes. Se analizaron manuales de operación y mantenimiento, perfiles del personal y registros históricos. Los resultados permitieron descartar hipótesis al no evidenciar incumplimientos operativos ni deficiencias en la competencia del personal. Asimismo, se identificó que la selección del acero SAE 1060 no respondió a un análisis contextual de las condiciones reales de abrasión, lo que orienta el análisis hacia factores técnicos del material y su desempeño en servicio.

5.3.5 Quinta fila de hipótesis

Finalmente, en esta quinta fila de hipótesis se evaluaron causas latentes que pueden haber causado la hipótesis validada en el punto anterior.

Figura 21.

Quinta línea de hipótesis.



Nota. Línea de causas latentes.

La figura presenta la etapa final del RCA, donde se evaluaron posibles deficiencias en la gestión técnica, trazabilidad de datos, asignación de responsabilidades y documentación de mantenimiento. El análisis permitió identificar, una brecha en la actualización de las especificaciones técnicas de los blindajes frente a las condiciones reales del río Lebrija. A continuación, se presenta el proceso de verificación de hipótesis que sustentó esta conclusión.

Figura 22.

Quinta línea de hipótesis.

No.	Hipótesis Generadas	Descripción de la Hipótesis	Acción de Verificación	Responsable verificación de hipótesis	Argumento y/o comentario resultado de la verificación	Argumento y/o comentario resultado de la verificación
18	La organización no considera las particularidades del entorno ambiental en sus decisiones técnicas.	Esta hipótesis plantea que las decisiones relacionadas con materiales, mantenimiento o rediseños se toman sin tener en cuenta las condiciones reales del entorno de operación, como la carga de sedimentos abrasivos o el comportamiento hidráulico local del río Lebríja.	Revisión de documentos técnicos, reportes de mantenimiento y actas de reuniones técnicas.	Santiago Ramirez Jones	Aunque no existe un rediseño material implementado, sí se evidencia que la organización conoce las condiciones abrasivas del entorno, ya que realizó un estudio sedimentológico y cuenta con reportes técnicos detallados sobre la agresividad del agua. El problema no fue ignorar el entorno, sino no transformar ese conocimiento en decisiones técnicas concretas (por ejemplo, cambio de material o rediseño).	Hipótesis Descartada
19	La organización no cuenta con una trazabilidad ni sistema de análisis de datos de los blindajes.	Esta hipótesis plantea que no existe una base de datos técnica ni un proceso estructurado para hacer seguimiento al desempeño de los blindajes: fechas de instalación, ciclos de vida, patrones de desgaste, ni correlación con condiciones operativas. Esto limita la capacidad de identificar tendencias o tomar decisiones informadas, aunque no sea directamente responsable del desgaste.	Revisión de archivos de mantenimiento, informes visuales y fotográficos entre 2020 y 2024. Verificación de si existe una plataforma o registro técnico consolidado sobre desgaste.	Santiago Ramirez Jones	Se confirma que no existe una trazabilidad consolidada sobre el comportamiento de los blindajes. Sin embargo, la ausencia de análisis no generó el desgaste, sino que impidió su detección oportuna y favoreció su repetición, siendo un factor contribuyente.	Hipótesis Descartada
20	Se identifica una brecha en la actualización de las especificaciones técnicas de los blindajes frente a los cambios en las condiciones hidrosedimentológicas del río, lo que ha llevado a mantener soluciones históricas que no responden al entorno operativo actual.	Pese a la recurrencia de la falla, la organización no ha implementado cambios de diseño, ni ha estudiado nuevas aleaciones o modificaciones técnicas. El problema se gestiona solo de forma reactiva mediante compras repetitivas de repuestos, sin atacar la raíz del problema. Esta omisión ha generado ciclos de desgaste y reemplazo sin resolución de fondo.	Revisión del contenido de los manuales MPSGI002 (Mantenimiento) y MPSGI004 (Operación) para verificar si existe alguna estrategia, línea de acción o recomendación técnica formal sobre el problema recurrente de desgaste. Revisión de actas de reuniones técnicas o reportes post-falla que demuestren una intención institucional de superar la recurrencia del evento.	Santiago Ramirez Jones	A pesar de la reiteración del fenómeno de desgaste en los blindajes desde al menos 2020, no se encontraron reportes post-falla, informes técnicos de análisis, ni documentos que indiquen acciones de mejora estructural, rediseño o evaluación de materiales. La información disponible está limitada a intervenciones operativas básicas y reposición de componentes, sin evidencia de haber intentado comprender ni mitigar técnicamente la causa del problema. Tampoco se hallan recomendaciones técnicas o referencias al fenómeno en los manuales MPSGI002 o MPSGI004, lo que refuerza la hipótesis de que no se ha desarrollado ninguna estrategia técnica formal frente al desgaste.	Hipótesis Validada
21	La organización no ha asignado responsabilidades técnicas claras para el análisis de causas de falla.	Esta hipótesis sugiere que dentro de la estructura organizacional no se han definido cargos ni responsables encargados de realizar análisis de causas cuando ocurren fallas por desgaste. En caso de ser cierta, esto implicaría que las decisiones técnicas son improvisadas o no están fundamentadas.	Revisión del Manual de Mantenimiento MPSGI002, en el que se establecen roles y competencias técnicas del personal encargado. Entrevistas o consultas con personal de mantenimiento sobre procedimientos posteriores a fallas.	Santiago Ramirez Jones	Se evidenció que sí existen responsables designados para el diagnóstico técnico y la atención a fallas, incluyendo personal calificado con experiencia en análisis técnico. Aunque puede haber oportunidades de mejora, la responsabilidad sí está asignada.	Hipótesis Descartada
22	La organización no cuenta con un sistema formal para documentar intervenciones de mantenimiento.	Revisión de los registros de mantenimiento e informes técnicos post-parada entre 2020–2024.	Revisión de los registros de mantenimiento e informes técnicos post-parada entre 2020–2024.	Santiago Ramirez Jones	Se cuenta con reportes detallados de mantenimiento, con evidencias fotográficas, inspecciones visuales, actas de intervención y observaciones técnicas. Estas evidencias reflejan que la organización sí tiene un sistema de documentación técnica, incluso si no se traduce en acciones correctivas efectivas.	Hipótesis Descartada

Nota. Se realizó la verificación de la quinta línea, sobre causas latentes.

Se puede observar que, a partir de la revisión de manuales, registros técnicos, actas y reportes históricos, se descartaron hipótesis relacionadas con ausencia de responsabilidades, falta de documentación o desconocimiento del entorno operativo. Sin embargo, se validó la existencia de una brecha en la actualización de las especificaciones técnicas de los blindajes frente a las condiciones reales de sedimentación del río. Esta situación ha favorecido la repetición de soluciones correctivas sin una intervención estructural que aborde la causa técnica del desgaste.

En síntesis, el análisis de causa raíz permitió demostrar que el desgaste prematuro de los blindajes no es un evento fortuito ni exclusivamente físico, sino la consecuencia de una cadena de decisiones técnicas que culminan en una selección de material incompatible con las condiciones reales del río Lebrija.

La validación progresiva de hipótesis físicas, humanas y organizacionales permitió identificar que el acero SAE 1060, aunque funcional desde un punto de vista estructural, no posee la resistencia necesaria frente a un entorno de alta carga erosiva, lo que explica la recurrencia del daño pese a que las condiciones de operación y montaje sean adecuadas. Este resultado constituye la base técnica que justifica la necesidad de evaluar alternativas de material y rediseño, las cuales se desarrollan en el siguiente objetivo del trabajo.

6. Recomendaciones propuestas

En el ámbito de la gestión de activos industriales, el mantenimiento desempeña un papel fundamental para garantizar la confiabilidad, eficiencia y sostenibilidad de los sistemas productivos. Más allá de corregir fallas una vez ocurren, una estrategia de mantenimiento bien estructurada permite anticiparse a los problemas, reducir costos operativos y prolongar la vida útil de los equipos. En este contexto, resulta esencial no solo identificar las causas de las fallas, sino también traducir ese conocimiento en acciones prácticas que mejoren el desempeño del sistema en el largo plazo.

A partir del análisis realizado en la Central Hidroeléctrica Palmas, se evidencia la necesidad de adoptar medidas técnicas que respondan a los hallazgos del estudio de desgaste en los blindajes de turbinas. Esta sección se enfoca en proponer recomendaciones orientadas a fortalecer el mantenimiento preventivo, así como en evaluar posibles mejoras en los materiales o tratamientos superficiales empleados.

6.1 Aplicación del Algoritmo de Decisión MCC (Norma SAE JA1012)

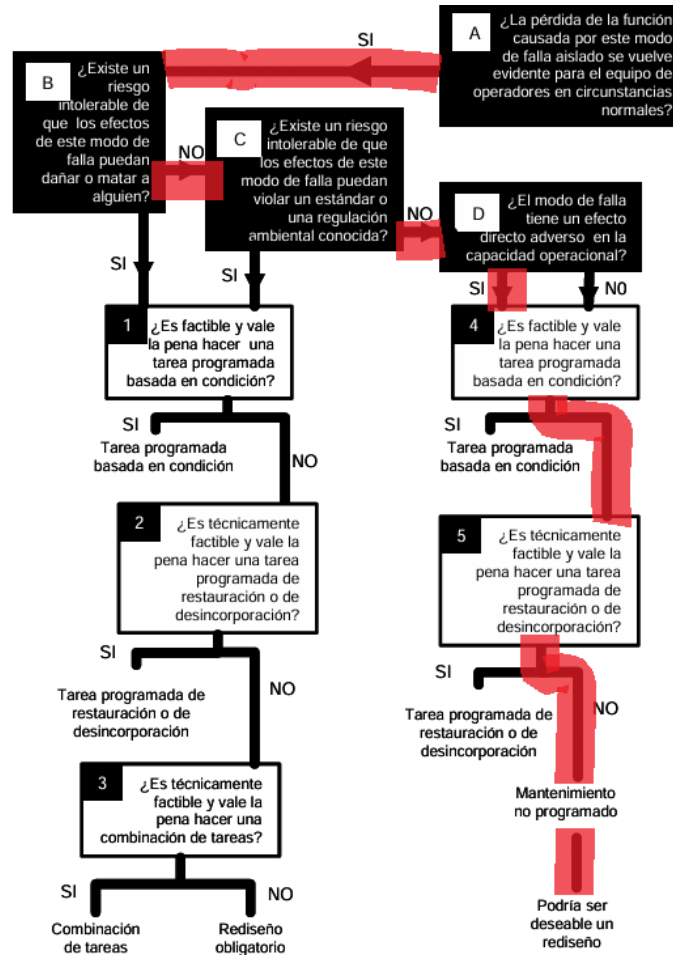
Al identificar las causas principales del desgaste prematuro en los blindajes de las turbinas de la Central Hidroeléctrica Palmas mediante un análisis de causa raíz, se debe establecer qué tipo de tareas de mantenimiento son más adecuadas para abordar el problema de forma adecuada. Para esto, se toma como referencia el algoritmo de decisión presentado por la norma SAE JA1012, el cual forma parte del enfoque de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad.

Este algoritmo permite determinar, en función del tipo de falla, su impacto y la viabilidad técnica de intervención, cuál debe ser la política de mantenimiento más efectiva: tareas programadas o rediseño. En este caso particular, el desgaste por erosión identificado en los

blindajes puede ser tratado siguiendo esta lógica. A continuación, se describe la aplicación del algoritmo paso a paso, desde la evaluación de las consecuencias hasta la definición de tareas específicas.

Figura 23.

Aplicación del algoritmo de decisión.



Nota. Adaptado del algoritmo de decisión del Mantenimiento Centrado en Confiabilidad conforme a la norma SAE JA1012. Tomado de: SAE International. (2011). SAE JA1012: A guide to the reliability-centered maintenance (RCM) standard. SAE International.

La figura ilustra la aplicación del algoritmo de decisión MCC para un modo de falla cuya consecuencia es operacional, sin riesgo para la seguridad o el ambiente. El recorrido evidencia que no resulta técnicamente viable implementar tareas programadas basadas en condición ni restauración preventiva, por lo que la estrategia resultante corresponde a mantenimiento no programado. No obstante, el análisis sugiere que podría evaluarse un rediseño como medida estructural para mitigar la recurrencia del evento.

¿La pérdida de la función causada por este modo de falla solo se vuelve evidente para el equipo de operadores en circunstancias normales?

Si, porque la pérdida de función causada por el desgaste prematuro de los blindajes de las turbinas se manifiesta de forma evidente para el equipo de operación durante las condiciones normales de funcionamiento. Este tipo de desgaste puede generar señales que son detectables sin necesidad de herramientas diagnósticas avanzadas, como el aumento en los niveles de vibración, la disminución del rendimiento de la unidad. Además, estos indicios se corroboran durante las inspecciones internas programadas, donde se identifican daños visibles como surcos, cavidades y pérdida de material, siendo la forma principal en la que los operados lo notan.

¿Existe un riesgo intolerable de que los efectos de este modo de falla puedan dañar o matar a alguien?

No, ya que el modo de falla analizado no representa un riesgo intolerable para la seguridad del personal. Aunque genera consecuencias operacionales importantes como la reducción de la eficiencia, paradas no programadas y mayores costos de mantenimiento, no se han identificado condiciones en las que este desgaste comprometa directamente la integridad física de los

operadores. Las intervenciones sobre los blindajes se realizan en condiciones controladas, con la planta fuera de servicio, y siguiendo protocolos de seguridad establecidos por la empresa.

¿Existe un riesgo intolerable de que los efectos de este modo de falla puedan violar un estándar o una regulación ambiental conocida?

No, aunque el desgaste de los blindajes puede afectar la eficiencia de la turbina y generar la necesidad de intervenciones más frecuentes, no se ha identificado que este modo de falla represente un riesgo directo de violación a estándares o regulaciones ambientales. El sistema hidráulico de la PCH Palmas mantiene un circuito cerrado donde el agua retorna al río sin ser contaminada, y no se presentan vertimientos de sustancias tóxicas asociadas al deterioro de los blindajes. Además, la central cuenta con seguimiento periódico de parámetros fisicoquímicos del agua, en cumplimiento de la normatividad ambiental y siendo controlado por la CDMB.

¿El modo de falla tiene un efecto directo adverso en la capacidad operacional?

Si, este desgaste prematuro de los blindajes de las turbinas tiene un efecto directo negativo sobre la capacidad operacional de la central hidroeléctrica, reduciendo la eficiencia hidráulica del sistema, causando paradas no programadas de las unidades generadoras. Como resultado, se afecta la disponibilidad del sistema, se disminuye la capacidad de generación eléctrica y se incrementan los costos operativos y de mantenimiento.

¿Es factible y vale la pena hacer una tarea programada basada en condición?

No, aunque desde el punto de vista técnico sería factible implementar una tarea basada en condición, en este caso no resulta lo suficientemente efectiva ni justificable como política principal

de mantenimiento. El desgaste en los blindajes se ha mostrado como un fenómeno progresivo, que podría ser parcialmente anticipado mediante el monitoreo de variables como vibración o eficiencia. Sin embargo, el análisis de causa raíz reveló que la causa principal del daño está relacionada con la interacción erosiva entre los materiales actuales del blindaje y los sedimentos del río Lebrija, los cuales contienen partículas minerales de alta dureza. Por esta razón, aunque se podría hacer un seguimiento al estado del componente, esto no evitaría que el desgaste ocurra ni resolvería el problema de fondo.

¿Es técnicamente factible y vale la pena hacer una tarea programada de restauración o de desincorporación?

Aunque sea posible programar una restauración o una desincorporación anticipada de los blindajes, esta medida por sí sola no asegura que el componente alcance la vida útil para la que fue diseñado. El análisis de causa raíz mostró que el desgaste prematuro está asociado principalmente a condiciones erosivas del medio hidráulico y a posibles limitaciones en el material actual de los blindajes. Por lo tanto, restaurar o reemplazar periódicamente el componente sin modificar estos factores solo prolongaría la repetición del problema, manteniendo altos los costos de mantenimiento y la pérdida de confiabilidad.

Dado que el componente no cumple con su vida útil esperada bajo las condiciones actuales de operación, y que las acciones de restauración no corrigen la causa técnica de la falla, la norma SAE JA1012 establece que en estos casos el recorrido lógico del algoritmo lleva a considerar tareas no programadas como opción base. No obstante, ante la recurrencia del problema y su impacto en la operación, el mismo marco metodológico señala que podría ser necesario un rediseño. En este

caso, dicho rediseño implicaría la evaluación de nuevos materiales, recubrimientos o tratamientos superficiales, con propiedades mejoradas frente al desgaste por erosión, permitiendo así que el componente cumpla con su función durante toda su vida útil de diseño.

6.2 Propuesta de alternativas de solución

De acuerdo con lo que también contempla la norma SAE JA1012, se plantea la necesidad de un rediseño. Este rediseño no implica una modificación geométrica de la pieza, sino una reformulación del material base y/o del tratamiento superficial aplicado, con el objetivo de asegurar una vida útil con los requerimientos operacionales de la planta.

Bajo este contexto, la selección de materiales y tecnologías se realizó a partir de un análisis técnico sustentado en literatura académica y trabajos aplicados en componentes sometidos a condiciones hidráulicas similares. Diversos estudios han demostrado que, en sistemas donde predomina la erosión por partículas sólidas, la vida útil de los componentes está fuertemente condicionada por las propiedades tribológicas del material expuesto, especialmente su resistencia al desgaste, más que por su resistencia mecánica global (ASM International, 1992; Bhushan, 2002).

Una primera línea de solución ampliamente documentada corresponde al uso de recubrimientos superficiales, los cuales permiten mejorar la resistencia al desgaste sin modificar de forma significativa el diseño ni el material base del componente. Investigaciones como la desarrollada por Granobles Urbano (2013), muestran que los recubrimientos aplicados por procesos de rociado térmico permiten conservar la geometría de componentes hidráulicos sometidos a erosión, mientras que estudios más recientes, enfocados en procesos como HVOF, evidencian mejoras aún más significativas en la resistencia al desgaste erosivo por impacto de

partículas sólidas, particularmente en aplicaciones del sector hidroeléctrico (Pachón Medina, 2015).

También se ha evaluado la alternativa de usar aceros antidesgaste como material principal, por lo que la inclusión de una lámina antidesgaste tipo MAXDUR PLUS 500 dentro de las alternativas evaluadas responde a la necesidad de comparar un enfoque de mejora superficial, basado en recubrimientos, frente a un enfoque de material resistente al desgaste, permitiendo así un análisis más completo de las soluciones disponibles en el entorno industrial.

Con base en estos criterios, y considerando la compatibilidad con el sistema actual, la experiencia reportada en aplicaciones similares y la viabilidad técnica de implementación, se seleccionaron tres alternativas para comparación:

- Acero 1060 con recubrimiento por termorrociado.
- Acero 1060 con recubrimiento HVOF de 0.5 mm en Carburo de Tungsteno
- Lamina de acero MAXDUR PLUS 500 antidesgaste.

6.3 Comparación técnica de las alternativas de solución

Se empezará haciendo una comparación de propiedades mecánicas y del material donde se tendrán en cuenta las siguientes propiedades:

- Dureza superficial (HRC): resistencia al rayado y desgaste por arena/sílice.
- Resistencia a erosión (pérdida ASTM G65).
- Resistencia a la cavitación: qué tan bien resiste impactos y cavitación.
- Porosidad
- Resistencia a la corrosión

- Vida útil estimada (respecto al 1060 base)

Tabla 8.

Propiedades de los materiales para los blindajes de las turbinas.

Propiedad	Acero 1060 base	Acero 1060 recubierto mediante termo-rociado con aleación FeCr	Acero 1060 con recubrimiento HVOF de 0.5 mm en Carburo de Tungsteno	Lamina de acero MAXDUR PLUS 500 anti-desgaste
Dureza superficial [HRC]	18-23	45-55	67-72	49-54
Resistencia a la erosión	165 mm ³ /1000 ciclos (BAJA)	≈80 – 120 mm ³ /1000 ciclos (MEDIA)	< 10 mm ³ /1000 ciclos (MUY ALTA)	≈60 – 80 mm ³ /1000 ciclos (ALTA)
Resistencia a la cavitación	BAJA: En condiciones normales de cavitación se presenta picado del material	MEDIA: Se pueden formar microgrietas por fatiga	ALTA en zonas de cavitación moderada. FALLA en zonas de alta cavitación.	MEDIA: Es confiable en zonas de agua neutra, debido a la corrosión.
Porosidad	El acero macizo no presenta porosidad superficial	Entre 3–8%, dependiendo de la técnica y el equipo	< 1%	Según normativa, debe ser de porosidad nula
Resistencia a la corrosión	BAJA: Alta tasa de oxidación en medios acuosos y salinos	MODERADA: Mejora frente al acero 1060, pero vulnerable en ambientes agresivos o ácidos 80.000.000	BUENA: A corrosión-erosión combinada, superior al metalizado y a placas estructurales.	MODERADA: Suficiente para agua neutra
Costo				96.100.000
Vida útil estimada (relativa según acero 1060)	1×	1,5–2×	3–4×	2–2,5×

Nota. En la tabla se presentan diferentes propiedades de los materiales con el fin de comparar el comportamiento en cada uno.

Los datos presentados en la tabla permiten evidenciar las diferencias en el desempeño de cada uno de los materiales frente a los principales mecanismos de falla observados en el entorno hidráulico de operación: erosión, cavitación, corrosión y desgaste combinado.

El acero 1060 en estado base, sin tratamiento térmico ni protección superficial, presenta los valores más bajos en cuanto a dureza, resistencia a la erosión y vida útil estimada. Su baja resistencia lo posiciona como el material más débil en condiciones hidráulicas agresivas.

La aplicación de un recubrimiento de aleación FeCr mediante termo-rociado por llama mejora algunas propiedades, especialmente la resistencia a la erosión, que reduce la pérdida con respecto al acero base. Sin embargo, su porosidad (entre 3 y 8%) lo hace susceptible a microgrietas, limitando su comportamiento frente a cavitación y a la acción combinada con fluidos agresivos. Aun así, representa una mejora viable, con un aumento estimado de vida útil de entre 1,5 a 2 veces.

En contraste, el recubrimiento por HVOF de 0.5 mm en carburo de tungsteno (WC-Co) destaca por su excelente desempeño técnico. La dureza superficial alcanza entre 67–72 HRC, y su resistencia a la erosión es muy alta, con pérdidas menores a 10 mm³/1000 ciclos. Asimismo, su resistencia a la cavitación es elevada en zonas moderadas, y su porosidad menor al 1% garantiza una alta resistencia a la corrosión por erosión. Esto se traduce en una vida útil estimada de 3 a 4 veces superior a la del acero base.

Finalmente, la lámina de acero antidesgaste MAXDUR PLUS 500 ofrece un equilibrio interesante: buena resistencia a la erosión y dureza superficial de hasta 54 HRC, sin porosidad y con una vida útil estimada de 2 a 2,5 veces superior. Sin embargo, su desempeño en entornos de alta cavitación no alcanza el nivel del recubrimiento HVOF.

6.4 Propuestas de mejora al mantenimiento preventivo y predictivo.

El análisis causa raíz realizado identificó que, si bien la empresa cuenta con procedimientos operativos y de mantenimiento documentados, existe una brecha significativa entre los datos recolectados y el uso técnico que se les da para prevenir, diagnosticar o anticipar el desgaste acelerado de los blindajes.

6.4.1 Seguimiento individual a los blindajes

Actualmente no existe un registro histórico por blindaje que permita conocer su vida útil, material, zona instalada o fecha de intervención. Esta falta de trazabilidad impide comparar fallas entre unidades o evaluar el comportamiento real del material. Se propone crear un registro individualizado que incluya:

- Placas de identificación grabadas con láser para los blindajes.
- Fecha de instalación.
- Material y especificación técnica.
- Unidad y ubicación específica.
- Fecha y descripción de cada intervención.
- Fotografías asociadas a inspecciones visuales.
- Tiempo de operación acumulado.
- Observaciones técnicas.

Esta base de datos permitiría generar estadísticas, identificar tendencias de falla, y mejorar decisiones de diseño, reemplazo o cambio de material. Si se tratan de inspecciones visuales, se propone diseñar un formato de inspección técnica que: Identifique la zona dañada, clasifique el tipo de desgaste observado (erosión, cavitación), determine su profundidad o severidad estimada, e incluya imágenes dentro del componente. Esto no solo mejora el mantenimiento preventivo, sino que aporta insumos clave para análisis posteriores y rediseños futuros.

6.4.2 Dar uso predictivo a los datos de vibración, temperatura y velocidad

Aunque se cuenta con sensores y mediciones periódicas, no existe un análisis de tendencias ni alertas técnicas asociadas. Se propone:

- Digitalizar los registros históricos por unidad
- Graficar la evolución de vibraciones (RMS) en cojinetes críticos
- Comparar con los límites normativos de la ISO 20816-5
- Establecer umbrales internos de alerta y acción

La relación entre vibración y desgaste es fundamental en este análisis. A medida que el blindaje pierde simetría por efecto de la erosión y la cavitación, el flujo interno de la turbina se vuelve más turbulento, generando desbalances hidráulicos que se reflejan directamente en el aumento de vibraciones, variaciones de temperatura en cojinetes y desviaciones en la velocidad de operación.

El seguimiento conjunto de estas variables permite utilizar los datos existentes como indicadores indirectos del deterioro de los blindajes, anticipando condiciones que pueden acelerar el desgaste y permitiendo programar intervenciones en el momento técnicamente adecuado.

6.4.3 Crear rutinas de mantenimiento predictivo para los blindajes

El manual actual no establece una frecuencia de revisión, inspección o medición de espesores para blindajes. Se propone:

- Una inspección visual detallada anual
- Medición de espesores cada 12 meses mediante ultrasonido: La medición periódica del espesor permite construir una curva de tendencia del desgaste del blindaje a lo largo del tiempo. A partir de esta información es posible estimar la tasa de pérdida de material y anticipar el momento en que el componente requerirá intervención, lo que facilita la planificación de la compra del repuesto con meses de antelación y evita adquisiciones de emergencia que prolonguen los tiempos de indisponibilidad.

- Revisión de ajustes, soldaduras y fijaciones: Estas rutinas fortalecen el monitoreo del componente más afectado por el ambiente erosivo del río, y no implican grandes paradas que afecten la disponibilidad de la planta.

6.5 Impacto esperado

El cambio hacia un material más robusto, como los que se presentaron en esta sección, representa una acción correctiva de raíz que permitirá tanto aumentar la vida útil de los blindajes, disminuyendo la frecuencia de intervención y sustitución, como optimizar los costos de mantenimiento en el mediano plazo, al reducir la cantidad de repuestos requeridos y la intervención del personal técnico, dándole mayor seguridad operativa y eficiencia a la planta.

Con respecto a las acciones de mantenimiento preventivo y predictivo, implementar estas acciones no implica grandes inversiones, pero sí transforma la cultura del mantenimiento de la empresa, haciendo que los niveles de disponibilidad aumenten a medida que se implementen estas recomendaciones, permitiendo así detectar tempranamente el desgaste y anticipar la intervención antes de que se presenten fallas, ya sea mediante las inspecciones visuales o análisis de las diferentes variables, y sobre todo establecer una cultura de mejora continua, donde el aprendizaje organizacional se convierte en una herramienta preventiva frente a eventos repetitivos.

La combinación de ambas estrategias permitirá a la organización mejorar la falla constante que estaba presentando con los blindajes, ya que ese plantea una solución estructural, y sobre todo solucionando el problema de raíz, mejorando la confiabilidad de los activos, fortaleciendo las prácticas tanto técnicas como operativas y sentando las bases para una gestión moderna del mantenimiento.

7. Conclusiones

El análisis histórico de los registros de operación y mantenimiento permitió establecer que la PCH Palmas opera bajo un contexto operacional altamente exigente. Este se caracteriza por un proceso continuo de generación, ausencia de redundancia real entre unidades, alta dependencia del recurso hídrico y exposición permanente a un medio con elevada carga de sedimentos. Estas condiciones implican que los blindajes trabajan en un entorno donde las consecuencias de falla son significativas en términos de disponibilidad, costos y estabilidad del sistema. En este contexto, la confiabilidad del conjunto turbina-generator no puede evaluarse de forma aislada, sino que está condicionada por el régimen hidráulico y por la logística asociada al mantenimiento y disponibilidad de repuestos.

El Análisis de Causa Raíz, desarrollado conforme a la norma UNE-EN 62740, permitió establecer que el desgaste prematuro de los blindajes no corresponde a un simple problema de erosión superficial, sino a la manifestación de una cadena causal que integra mecanismos físicos (cavitación, erosión y oxidación localizada), decisiones humanas (selección de materiales y soluciones históricamente reactivas) y causas latentes organizacionales (ausencia de una estrategia de rediseño frente a un modo de falla no controlable por mantenimiento). De esta forma, se comprobó que el problema es sistémico y recurrente, y que su eliminación requiere intervenir las causas estructurales que lo originan.

La aplicación del algoritmo de decisión del Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (SAE JA1012) permitió establecer que el desgaste de los blindajes en la PCH Palmas corresponde a un modo de falla dominado por las condiciones sedimentológicas del río Lebrija, por lo que no

puede ser gestionado mediante tareas de mantenimiento preventivo. El análisis evidenció que el acero base actualmente utilizado presenta una resistencia insuficiente frente a un medio caracterizado por partículas de sílice de alta dureza, lo que explica los fenómenos de erosión y cavitación observados. En consecuencia, se identificaron como alternativas técnicas viables el uso de aceros de alta resistencia al desgaste, como el MaxDur 500, y la aplicación de recubrimientos por proyección térmica HVOF (WC-Co-Cr), capaces de ofrecer mayor dureza, tenacidad y resistencia tribológica frente a flujos de alta velocidad. De manera complementaria, se concluye que el problema del desgaste no está asociado únicamente al material, sino también a la ausencia de una gestión sistemática de la condición de los blindajes, por lo que se propone implementar un sistema de seguimiento individual y un enfoque de mantenimiento predictivo basado en el monitoreo de espesor, vibración, temperatura y velocidad, permitiendo detectar anticipadamente los efectos hidráulicos del desgaste, planificar las intervenciones de manera técnica y reducir la ocurrencia de paradas no programadas.

Se recomienda a la organización consolidar el uso sistemático del Análisis de Causa Raíz como herramienta permanente dentro de la gestión de mantenimiento, extendiendo su aplicación a otros modos de falla críticos en equipos de generación hidráulica. El enfoque desarrollado en este trabajo demostró su capacidad para identificar causas técnicas estructurales y evitar intervenciones correctivas repetitivas sin solución de fondo. Asimismo, el modelo aplicado puede utilizarse como referencia metodológica para analizar fallas en otros componentes sometidos a desgaste hidráulico, promoviendo decisiones basadas en confiabilidad.

Adicionalmente, se sugiere fortalecer el monitoreo predictivo mediante la integración de análisis vibracional orientado a la detección temprana de cavitación, correlacionando las mediciones de vibración con el caudal de operación y la severidad vibracional registrada en las unidades. De igual manera, se recomienda incorporar análisis sedimentológicos periódicos del río con el fin de monitorear la evolución de la carga sólida y su influencia en el desgaste de los componentes hidráulicos.

Finalmente, se propone evaluar soluciones hidráulicas complementarias que permitan reducir el impacto de sedimentos en el sistema, así como complementar el análisis técnico con estudios económicos y de gestión del riesgo, incluyendo evaluaciones del costo del ciclo de vida y comparaciones costo-beneficio entre alternativas de material, recubrimiento o rediseño.

Referencias Bibliográficas

- Asociación Española de Normalización (AENOR). (2015). UNE-EN 62740: Root cause analysis (RCA).
- CHEC – Unidad de Alta Ingeniería. (2025). Detalle técnico y alcance específico metalización blindaje Central Palmas.
- Chhetry, B., & Rana, K. (2015). Effect of sand erosion on turbine components: A case study of Kali Gandaki “A” Hydroelectric Project (144 MW), Nepal. *Hydro Nepal*, 17, 24–33. <https://doi.org/10.3126/hn.v17i0.13270>
- Electrificadora de Santander S.A. E.S.P. (s. f.). Manual de operación planta Palmas (MPSGI004, Versión 04).
- Electrificadora de Santander S.A. E.S.P. (s. f.). Manual de mantenimiento de equipos principales – Central Palmas (MPSGI002, Versión 03).
- ESSA Grupo EPM. (2024). Servicio de análisis físico químico y caracterización de sedimentos presentes en la conducción y fosos de turbina de las unidades de generación – PCH Palmas [Informe técnico]. Electrificadora de Santander S.A. E.S.P.
- Granobles Urbano, J. P. (2013). Estudio de la resistencia a la erosión-corrosión de los impulsores de una bomba Wemco recubiertos por rociado térmico [Pasantía de investigación, Universidad Autónoma de Occidente]. Repositorio institucional UAO. <http://hdl.handle.net/10614/5006>
- Ghiban, B., Safta, C.-A., Ion, M., Crângașu, C. E., & Grecu, M.-C. (2017). Structural aspects of silt erosion resistant materials used in hydraulic machines manufacturing. *Energy Procedia*, 112, 75–82. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.1064>

- International Organization for Standardization. (2009). ISO 10816-3: Mechanical vibration — Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts — Part 3: Industrial machines with nominal power above 15 kW and nominal speeds between 120 r/min and 15 000 r/min.
- Latino, R. J., Latino, K. C., & Latino, M. A. (2011). Root cause analysis: Improving performance for bottom-line results (4th ed.). CRC Press.
- Madero Ortiz, J. S. (2016). Estudio tribológico de aleaciones antidesgaste [Proyecto de grado, Universidad Distrital Francisco José de Caldas]. Repositorio Institucional UDFJC. <http://hdl.handle.net/11349/5337>
- Mobley, R. K. (1999). Root cause failure analysis. Newnes.
- Neopane, H. P. (2010). Sediment erosion in hydro turbines (Doctoral dissertation). Norwegian University of Science and Technology (NTNU), Trondheim, Norway.
- Orjuela Baracaldo, S., & Gómez Ibarra, N. E. (2020). Efecto de los parámetros de proyección y su influencia en los cambios morfológicos y microestructurales de recubrimientos producidos mediante la técnica de termoaspersión a la flama [Trabajo de grado, Universidad Libre].
- Pachón Medina, I. F. (2015). Implementación del proceso de proyección térmica-HVOF para la generación de recubrimientos (WC-Co-Cr) en aceros CrNi como tratamiento para incrementar la resistencia al desgaste por erosión de partículas sólidas [Proyecto de grado, Universidad de los Andes]. Repositorio institucional Uniandes. <https://hdl.handle.net/1992/18703>
- Paulsen, C., Boyens, J., Bartol, N., & Winkler, K. (2018). Criticality analysis process model: Prioritizing systems and components (NISTIR 8179). National Institute of Standards and Technology. <https://doi.org/10.6028/NIST.IR.8179>

nternational. (2002). SAE JA1012: A guide to the reliability-centered maintenance (RCM) standard. SAE International.

Sifonte, J. R., & Reyes-Picknell, J. V. (2017). Reliability centered maintenance – reengineered: Practical optimization of the RCM process with RCM-R. CRC Press.

XM. En el primer semestre del 2024, con el ingreso de 40 proyectos nuevos, se fortalece la seguridad del Sistema Interconectado Nacional. [En línea] (Recuperado en 24 febrero 2025). Disponible en: <https://www.xm.com.co/noticias/7028-en-el-primer-semester-del-2024-con-el-ingreso-de-40-proyectos-nuevos-se-fortalece-la>