 Institución Universitaria <small>Reacreditada en Alta Calidad</small>	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO ESPECIALIZACIÓN TIPO ARTÍCULO DEPARTAMENTO DE MECATRÓNICA Y ELECTROMECAÁNICA	Código	FDE 283
		Versión	01
		Fecha	14-10-2025

Análisis de Confiabilidad como Herramienta para Mejorar la Disponibilidad en Centrales de Generación de Energía eléctrica

Reliability Analysis as a Tool to Improve Availability in Electric Power Generation Plants

Johnatan Andrés Cardona Velásquez¹, María Vilma García Buitrago², María Isabel Ardila Marín³

Resumen

Este artículo analiza la confiabilidad, la mantenibilidad y la disponibilidad de la central hidroeléctrica Niquía de Empresas Públicas de Medellín, con el propósito de identificar oportunidades de mejora que contribuyeran a incrementar la eficiencia operativa y la capacidad de cumplir con las metas de energía firme. El estudio se desarrolló mediante la aplicación de diagramas de bloques de confiabilidad, que permitieron representar gráficamente las interacciones entre los diferentes componentes de la planta, y del análisis de Weibull, que se empleó para estimar la vida útil de los equipos y anticipar la ocurrencia de fallas. Para el procesamiento de la información y la simulación de escenarios se utilizó el software Isograph Availability Workbench, lo que facilitó la identificación de los elementos críticos dentro del sistema. Los resultados obtenidos evidenciaron que la aplicación conjunta de estas metodologías permitió identificar una disminución pronunciada de la confiabilidad en las primeras 2.000 a 3.000 horas de operación, especialmente en los modos asociados al sistema de control, la bobina de cierre y los puentes de tiristores, lo que confirma la presencia de fallas tempranas relacionadas con calibración, conexión o sensibilidad de los dispositivos electrónicos y la necesidad de priorizar acciones de mantenimiento orientadas a reducir los tiempos de indisponibilidad y aumentar la capacidad operativa de la planta. Se concluye que el uso sistemático de estas herramientas constituye una estrategia efectiva para mejorar la gestión del mantenimiento en centrales hidroeléctricas, ya que fortalece la toma de decisiones, optimiza la asignación de recursos y asegura una mayor confiabilidad y disponibilidad en la operación.

Palabras clave

Confiabilidad, Mantenibilidad, Disponibilidad, RAM, RBD, EPM, Weibull, Centrales Hidroeléctricas, Mantenimiento.


Abstract

This article analyzes the reliability, maintainability, and availability (RAM) of the Niquía Hydroelectric Power Plant operated by Empresas Públicas de Medellín (EPM), with the purpose of identifying improvement opportunities that contribute to increasing operational efficiency and the plant's capacity to meet firm energy targets. The study was developed through the application of Reliability Block Diagrams (RBD), which allowed a graphical representation of the interactions among the different components of the plant, and the Weibull analysis, used to estimate the useful life of the equipment and predict the occurrence of failures. For data processing and scenario simulation, the Isograph Availability Workbench software was employed, facilitating the identification of critical elements within the system. The results showed that the combined application of these methodologies revealed a significant decrease in reliability during the first 2,000 to 3,000 hours of operation, particularly in modes associated with the control system, closing coil,

¹ ITM, Medellín – Colombia, johnatancardona229773@correo.itm.edu.co. <https://orcid.org/0009-0001-5854-9253>

² ITM, Medellín – Colombia, mariagarcia@itm.edu.co. <https://orcid.org/0000-0002-7943-2636>

³ ITM, Medellín – Colombia, mariaardila9938@correo.itm.edu.co. <https://orcid.org/0000-0002-6817-0378>

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO ESPECIALIZACIÓN TIPO ARTÍCULO DEPARTAMENTO DE MECATRÓNICA Y ELECTROMECAÁNICA	Código	FDE 283
		Versión	01
		Fecha	14-10-2025

and thyristor bridges. This confirms the presence of early failures related to calibration, connection, or sensitivity of electronic devices and highlights the need to prioritize maintenance actions aimed at reducing downtime and improving the operational capacity of the plant. It is concluded that the systematic use of these tools constitutes an effective strategy for enhancing maintenance management in hydroelectric power plants, as it strengthens decision-making, optimizes resource allocation, and ensures greater reliability and availability in operation.

Keywords

Reliability, Maintainability, Availability, RAM, RBD, Weibull, Hydroelectric Plants, Maintenance.

NOMENCLATURA

Con el fin de garantizar la trazabilidad y rigurosidad del análisis, en esta sección se presenta la nomenclatura empleada en el desarrollo del modelo RAM aplicado a la PCH Niquía.


Se incluyen los símbolos, ecuaciones y parámetros fundamentales utilizados para el cálculo de los principales indicadores de confiabilidad (R), mantenibilidad (M) y disponibilidad (A), así como las funciones probabilísticas de falla ajustadas mediante el modelo de Weibull.

Esta tabla permite al lector identificar el significado físico y matemático de cada variable involucrada, sus unidades de medida y la ecuación correspondiente, facilitando la comprensión del proceso de modelado, simulación y evaluación de escenarios de mejora (ver Tabla 1).

Tabla 1

Tabla de símbolos y ecuaciones

Símbolo	Nombre del parámetro	Ecuación / Definición	Unidad	Interpretación
N_f	Número de fallas	Conteo de eventos en el periodo de observación	--	Cuántas fallas ocurren durante el periodo analizado
T_{obs}	Tiempo de observación	$t_{fin} - t_{inicio}$	Horas (h)	Tiempo total de operación efectiva usado para estimar MTBF
$MTBF$	Mean Time Between Failures (Tiempo medio entre fallas)	$MTBF = T_{obs} / N_f$	Horas (h)	Promedio del tiempo operativo entre una falla y la siguiente
$MTTR$	Mean Time To Repair (Tiempo medio de reparación)	$MTTR = \sum_{i=1}^{N_f} t_{reparación,i} / N_f$	Horas (h)	Promedio del tiempo que tarda en restablecer la operación tras una falla
λ	Tasa de fallas	$\lambda = \frac{1}{MTBF}$	Fallas / h	Frecuencia con que se presentan fallas; mide confiabilidad
μ	Tasa de reparación	$\mu = \frac{1}{MTTR}$	Reparaciones / h	Velocidad de reparación; mide mantenibilidad

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO ESPECIALIZACIÓN TIPO ARTÍCULO DEPARTAMENTO DE MECATRÓNICA Y ELECTROMECAÁNICA		Código	FDE 283
			Versión	01
			Fecha	14-10-2025

A	Disponibilidad intrínseca	$A = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$	--	Probabilidad de que el sistema esté operativo en un instante dado
R_t	Función de confiabilidad (Weibull)	$R_t = e^{-(t/\eta)^\beta}$	--	Probabilidad de que un elemento funcione sin fallar hasta el tiempo t
η	Parámetro de escala (Weibull)	--	Horas (h)	Tiempo característico de vida del componente (≈63,2 % de probabilidad de falla acumulada)
β	Parámetro de forma (Weibull)	--	Adimensional	Determina el tipo de régimen de fallas: β<1: infantil β=1: aleatorio β>1: desgaste
A_{global}	Disponibilidad global del sistema	$A_{global} = \prod_i A_i$	--	En sistemas en serie, el producto de las disponibilidades individuales
Δ A	Mejora proyectada	$\Delta A = A_{nuevo} - A_{base}$	Puntos %	Ganancia de disponibilidad al aplicar mejoras (predictivo o preventivo)

Nota. Elaboración propia (2025).


1. INTRODUCCIÓN

Empresas Públicas de Medellín (EPM) es una organización de servicios públicos que ha contribuido significativamente al desarrollo de la región, no solo por su impacto económico, sino también por su responsabilidad social y ambiental. En el marco de sus operaciones, las centrales hidroeléctricas representan un pilar fundamental, ya que aprovechan la energía hidráulica para la generación de electricidad. La disponibilidad de estas plantas es un aspecto crítico, pues influye directamente en la eficiencia operativa, la confiabilidad del sistema eléctrico y los costos de mantenimiento.

La potencia de una central puede variar desde unos pocos MW como en caso de las minicentrales hidroeléctricas hasta 14.000 MW. La energía garantizada en un lapso determinado, generalmente un año, está en función del volumen útil del embalse, y de la potencia instalada.

La disponibilidad de las plantas de generación de energía ha sido un tema recurrente de investigación en los últimos años debido a su impacto directo en la eficiencia operativa y la confiabilidad del sistema eléctrico. Diversos estudios han abordado la importancia de mantener altos niveles de disponibilidad para asegurar un suministro de energía constante y eficiente.

Las plantas de generación de energía que implementan sistemas de monitoreo avanzado y mantenimiento predictivo logran una mejora significativa en su disponibilidad, reduciendo el tiempo de inactividad no planificado (Martinez Monseco, 2020). En particular, los sistemas hidroeléctricos, como los gestionados

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO ESPECIALIZACIÓN TIPO ARTÍCULO DEPARTAMENTO DE MECATRÓNICA Y ELECTROMECAÁNICA	Código	FDE 283
		Versión	01
		Fecha	14-10-2025

por EPM, enfrentan desafíos específicos relacionados con la variabilidad de los recursos hídricos y la eficiencia de las turbinas, lo que justifica la necesidad de investigar formas de optimizar su disponibilidad.

El mantenimiento centrado en la fiabilidad (RCM) es un método para identificar y seleccionar aquellas políticas de gestión de fallos que contribuyan a alcanzar de manera eficaz y eficiente los niveles requeridos de seguridad, disponibilidad y coste de explotación (*UNE-EN 60300-3-11:2013 Gestión de la confiabilidad. Parte 3-11...*, s. f.). El RCM proporciona un proceso de decisión para identificar los requisitos, o actividades de gestión, de un mantenimiento preventivo aplicable y eficaz de los equipos de una instalación, teniendo en cuenta las consecuencias operativas, económicas y de seguridad que pudieran derivarse de fallos identificables y de los mecanismos de degradación responsables de aquellos fallos.

El análisis RAM (Confiabilidad, Disponibilidad y Mantenibilidad) ha sido ampliamente utilizado para mejorar la gestión del mantenimiento en diversas industrias, especialmente en el sector energético. La integración de las tres dimensiones (Confiabilidad, Mantenibilidad y Disponibilidad) a través de un enfoque de análisis RAM permite a las plantas identificar los puntos débiles del sistema y aplicar estrategias de mantenimiento más efectivas (Selvaraju & Hamid, 2018).

La confiabilidad se refiere a la probabilidad de que un sistema o componente funcione sin fallas durante un periodo específico, bajo condiciones dadas (Osman et al., 2022). Es un concepto central en la gestión de mantenimiento, ya que permite identificar los puntos débiles del sistema que pueden afectar su rendimiento.


La disponibilidad se define como la capacidad de un sistema para estar en funcionamiento cuando se necesita (*SoporteyCia - RCM2 | Estrategias para el ciclo de vida*, s. f.). Es un indicador crucial en las centrales de generación, pues refleja el tiempo que un sistema está operando en comparación con el tiempo total disponible.

La mantenibilidad está relacionada con la facilidad y rapidez con que un sistema o componente puede ser reparado o mantenido para que vuelva a operar (Osman et al., 2022). En el contexto de la generación de energía, una alta mantenibilidad significa tiempos de reparación más cortos y menores costos asociados con el mantenimiento.

El análisis CMD es un enfoque integral que combina los tres componentes clave de RAM. Este análisis permite identificar no solo los componentes más propensos a fallas, sino también las estrategias más eficientes para mejorar la disponibilidad a través de la gestión efectiva del mantenimiento.

El análisis de confiabilidad es un indicador relevante para mejorar la disponibilidad de los equipos y la calidad de los servicios prestados, y permite determinar que equipos están generando una baja probabilidad de funcionamiento óptimo de la planta. Estos resultados son particularmente relevantes para las centrales hidroeléctricas, donde los sistemas de generación deben mantenerse en óptimas condiciones para prevenir fallas imprevistas (*SoporteyCia - RCM2 | Estrategias para el ciclo de vida*, s. f.).

El uso de diagramas de bloques de confiabilidad (RBD) ha sido documentado como una herramienta eficaz para mejorar la fiabilidad y disponibilidad de sistemas complejos, como las plantas de generación de energía. Los RBD permiten visualizar las interacciones entre los componentes del sistema y predecir como los fallos de un componente pueden afectar el funcionamiento general.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO ESPECIALIZACIÓN TIPO ARTÍCULO DEPARTAMENTO DE MECATRÓNICA Y ELECTROMECAÁNICA	Código	FDE 283
		Versión	01
		Fecha	14-10-2025

En 2021, Bulut abordó el problema de determinar los periodos de mantenimiento en una central hidroeléctrica mediante un modelo combinado de toma de decisiones, en el cual se analizaron las distribuciones de probabilidad de fallas y se estimaron los parámetros de distribución de Weibull para determinar los periodos de mantenimiento del equipo, una vez que los autores determinaron los intervalos de mantenimiento óptimos para cada uno de los 16 grupos de equipos críticos, por ejemplo: Transformador de potencia 278 días, Cortacircuitos 310 días, Tanque de aceite a presión 747 días, Generador 251 días y Regulador de velocidad 31 días, entre otros. Durante una fase de un año monitoreando los equipos, ninguno de los 16 grupos críticos presento fallas, este resultado respalda la premisa de que combinar estadísticas de fallas históricas con la modelación de costos (mantenimientos VS fallos) puede producir políticas preventivas efectivas y de bajo riesgo.

Además, el análisis de Weibull es una técnica estadística que permite modelar la vida útil de los componentes de un sistema y predecir el tiempo hasta el siguiente fallo. Esta técnica ha sido empleada con éxito en la industria energética para mejorar los pronósticos de mantenimiento y optimizar los tiempos de inactividad. La distribución Weibull (especialmente aplicada en situaciones en las que la tasa de fallas no es constante a lo largo del tiempo) se utiliza para representar diferentes zonas de la curva de la bañera, que incluyen fallas prematuras, aleatorias y por desgaste (Singh et al., 2025).


Esto brinda una ventaja sobre la distribución exponencial, que solo representa la fase normal de operación con fallas aleatorias. No obstante, la distribución Weibull es un modelo paramétrico y requiere una cantidad significativa de datos para calcular los parámetros de forma, escala y localización. Esto puede ser un desafío en algunos casos, ya que los datos de los reportes de los equipos pueden estar incompletos, lo que aumenta la necesidad de filtrado y tratamiento de los datos y limita el tamaño de la muestra utilizable. Por su parte, la distribución exponencial depende del MTBF (Tiempo Medio entre Fallos) como única variable, lo que facilita su aplicación. Además, es utilizada para modelar eventos que ocurren de manera aleatoria y sin memoria.

El uso de metodologías RAM y Análisis CMD representa una oportunidad significativa para mejorar la fiabilidad y disponibilidad de las plantas (Ríos Velásquez et al., 2024) Al aplicar el análisis de Weibull y los diagramas de bloques de confiabilidad, este estudio contribuirá a identificar las principales causas de inactividad en la planta y proponer soluciones efectivas basadas en un enfoque matemático y estadístico, lo que permitirá a EPM optimizar sus pronósticos de desempeño y, en consecuencia, alcanzar la meta de mejorar la disponibilidad de sus centrales.

Los diagramas de bloques de confiabilidad (RBD) son herramientas visuales que se utilizan para representar la estructura de un sistema y sus componentes, permitiendo analizar como las fallas en un componente afectan la operación general del sistema. Este modelo es ampliamente utilizado en la ingeniería de sistemas, especialmente en la industria energética, para optimizar el diseño y la operación de las plantas.

El análisis de Weibull es una distribución estadística que se utiliza para modelar el tiempo hasta que ocurren fallas en un sistema, además proporciona una visión detallada de los patrones de fallas de los componentes (Bulut & Özcan, 2021), lo que permite a las empresas predecir el comportamiento de sus sistemas y planificar intervenciones de mantenimiento de manera más efectiva.

Este estudio, por tanto, representa una contribución al conocimiento aplicado en la gestión de plantas de generación de energía, ya que ofrece un marco metodológico claro y práctico para la mejora continua de la disponibilidad operativa.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO ESPECIALIZACIÓN TIPO ARTÍCULO DEPARTAMENTO DE MECATRÓNICA Y ELECTROMECAÁNICA	Código	FDE 283
		Versión	01
		Fecha	14-10-2025

Empresas Públicas de Medellín (EPM) opera 13 pequeñas centrales hidroeléctricas (PCH) con potencias unitarias menores a 20 MW, localizadas en el departamento de Antioquia, Colombia. El estudio abarca el periodo comprendido entre el 1 de enero de 2020 y el 31 de diciembre de 2024, a partir de los registros históricos de fallas y mantenimientos almacenados en los sistemas de gestión de la información de EPM. Se excluyen fenómenos de fuerza mayor y restricciones externas para concentrarse en los eventos internos que afectan la confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad (CMD).

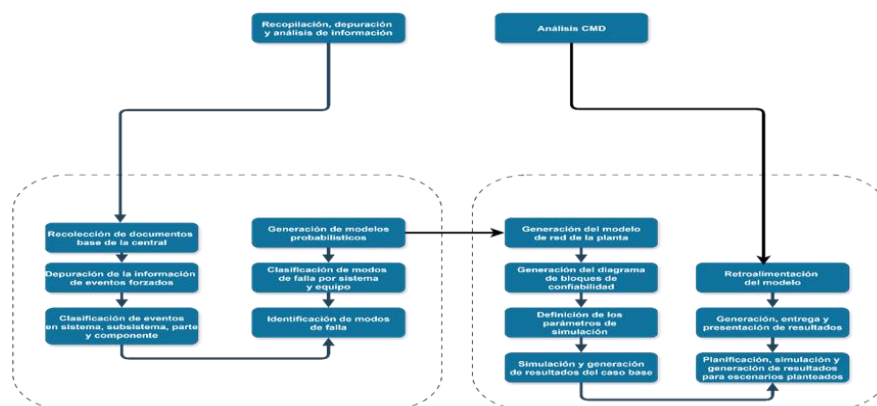
En el caso de la central de generación menor Niquia, de EPM, la disponibilidad promedio ponderada es de 95,2%, lo que equivale a unas 420 horas de indisponibilidad al año. Esta cifra plantea la necesidad de estudiar estrategias que permitan alcanzar mayores niveles de disponibilidad. Surge entonces la pregunta: ¿es posible incrementar la disponibilidad de esta planta mediante un análisis CMD que integre RBD y modelado Weibull, identificando los eventos críticos que afectan su desempeño y optimizando los pronósticos de confiabilidad?

La pertinencia de este estudio radica en la necesidad de maximizar la confiabilidad operativa y la disponibilidad de las pequeñas centrales hidroeléctricas de EPM, con especial énfasis en la central de generación menor Niquia. Actualmente, esta planta presenta tiempos de indisponibilidad aproximados de 420 horas. Esta magnitud de tiempo fuera de servicio no solo compromete la eficiencia global del sistema de generación, sino que también incrementa los costos asociados al mantenimiento correctivo y reduce la estabilidad del suministro energético entregado al sistema interconectado nacional. Bajo este contexto, resulta imperativo desarrollar estrategias basadas en técnicas avanzadas de análisis de confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad (CMD) que permitan identificar los eventos críticos que más afectan el desempeño, y sobre esta base, diseñar planes de acción orientados a la optimización de los recursos de mantenimiento y a la reducción de las pérdidas asociadas a la indisponibilidad no planificada.


2. METODOLOGÍA

La metodología representada en la Figura 1, se fundamenta en un enfoque sistemático que integra la recopilación de información, la depuración de datos y la modelación probabilística, con el fin de realizar un análisis CMD (Confiabilidad–Mantenibilidad–Disponibilidad) orientado a la evaluación de confiabilidad y desempeño de sistemas complejos.

Figura 1
Flujo de trabajo



Nota. Elaboración propia (2025).

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO ESPECIALIZACIÓN TIPO ARTÍCULO DEPARTAMENTO DE MECATRÓNICA Y ELECTROMECAÁNICA	Código	FDE 283
		Versión	01
		Fecha	14-10-2025

En una primera fase, se ejecuta la recolección de documentos base de la central y la depuración de la información asociada a eventos forzados, garantizando la consistencia y trazabilidad de los datos de entrada. Con esta información, los eventos son clasificados jerárquicamente en niveles de sistema, subsistema, parte y componente, lo que permite establecer una taxonomía detallada de fallas y generar los insumos requeridos para la construcción de modelos probabilísticos. Dichos modelos facilitan la clasificación de modos de falla por sistema y equipo, derivando en la identificación de modos de falla críticos que constituyen la base para la modelación posterior.

En la segunda fase, correspondiente al análisis CMD, se procede a la generación del modelo de red de la planta y a la elaboración del diagrama de bloques de confiabilidad, herramientas que permiten representar la estructura funcional del sistema y sus relaciones de dependencia. A partir de esta representación, se realiza la definición de parámetros de simulación, lo que conduce a la ejecución de simulaciones y obtención de resultados para el caso base, limpieza y normalización de datos (fechas y duraciones), cálculo de KPIs (MTBF, MTTR, λ , μ) por subsistema y componente, construcción de Paretos con % acumulado, curvas Weibull (sensibilidad $\beta \in \{0.47, 0.54, 0.67, 0.75, 0.89, \dots, 1.29\}$ y $\eta = (2500 \text{ h})$, RBD serie con rama paralela y simulación de escenarios (\downarrow MTTR 10–15 %, \uparrow MTBF 8–20 %).

El modelo resultante se somete a un proceso de retroalimentación y ajuste, con el propósito de validar su consistencia y robustez. Finalmente, se lleva a cabo la generación, entrega y presentación de resultados, así como la planificación y simulación de escenarios alternativos, lo cual posibilita la evaluación comparativa del comportamiento del sistema bajo diferentes condiciones operativas y de falla.

3. RESULTADOS

La caracterización de los componentes de la Central Hidroeléctrica Niquía constituye una etapa esencial dentro del análisis de Confiabilidad, Mantenibilidad y Disponibilidad (CMD), ya que permite identificar los elementos más críticos del sistema y comprender los modos de falla que afectan su desempeño operativo. A través de la revisión de registros históricos de mantenimiento, bitácoras operativas y reportes técnicos, se determinan las tasas de falla, tiempos medios de reparación y consecuencias asociadas a cada componente, estableciendo una matriz de criticidad que prioriza los activos con mayor impacto en la disponibilidad global de la planta.

Este diagnóstico posibilita modelar la confiabilidad del sistema mediante diagramas de bloque (RBD) y distribuciones de Weibull, con el fin de cuantificar el comportamiento de los equipos frente al envejecimiento y optimizar los planes de mantenimiento preventivo y predictivo.

Con base en la estructura funcional de la unidad de generación y sus sistemas auxiliares, se elaboró el diagrama de bloques de confiabilidad (RBD) que representa las relaciones de dependencia entre componentes críticos. Este modelo sirvió como base para la simulación de escenarios de disponibilidad y para la estimación global de confiabilidad del sistema (Figura 2).


	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO ESPECIALIZACIÓN TIPO ARTÍCULO DEPARTAMENTO DE MECATRÓNICA Y ELECTROMECÁNICA	Código	FDE 283
		Versión	01
		Fecha	14-10-2025

Figura 2

Diagrama RBD serie central Niquía

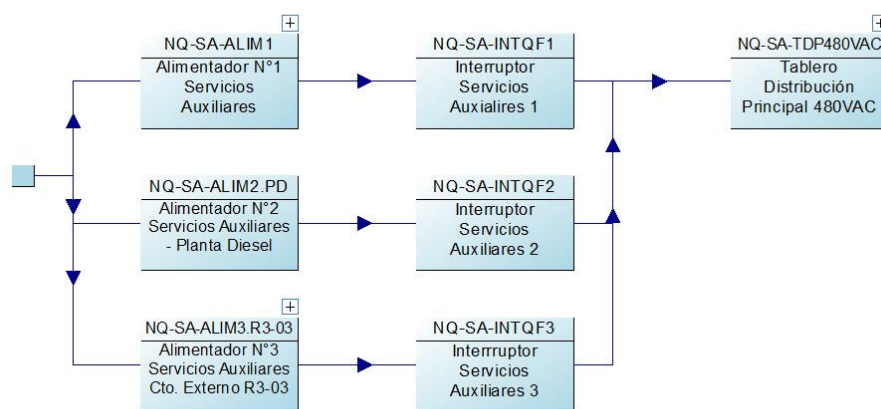


Nota. Elaboración propia (2025).

Cada bloque fue modelado como un componente con parámetros de confiabilidad individuales (β , η) derivados del análisis Weibull. El modelo en serie refleja la dependencia total del proceso de conversión energética, mientras que las ramas en paralelo representan redundancias o sistemas auxiliares que permiten mantener la operación parcial ante fallas menores. Este esquema permitió calcular la confiabilidad y disponibilidad globales mediante simulaciones Monte Carlo en el entorno RAM desarrollado (ver Figura 3).


Figura 3

Diagrama RBD paralelo central Niquía



Nota. Elaboración propia (2025).

En este sentido la caracterización detallada de fallas y componentes no solo sustenta la toma de decisiones técnicas, sino que también contribuye al propósito estratégico de EPM de fortalecer la confiabilidad y

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO ESPECIALIZACIÓN TIPO ARTÍCULO DEPARTAMENTO DE MECATRÓNICA Y ELECTROMECAÁNICA	Código	FDE 283
		Versión	01
		Fecha	14-10-2025

sostenibilidad de sus pequeñas centrales hidroeléctricas, con énfasis en la planta de generación menor Niquia.

La central Niquía está localizada en el Municipio de Bello, al norte de la ciudad de Medellín. Cuenta con una capacidad instalada de 21.000 KW correspondientes a su primera etapa, por cuanto la infraestructura física quedó habilitada para instalar en un futuro otras dos unidades generadoras para una capacidad total de 57.000 KW. La central Niquía entró en servicio en junio de 1993. Las aguas del embalse Riogrande II son conducidas a través de un túnel de 16,4 kilómetros hasta la casa de máquinas.

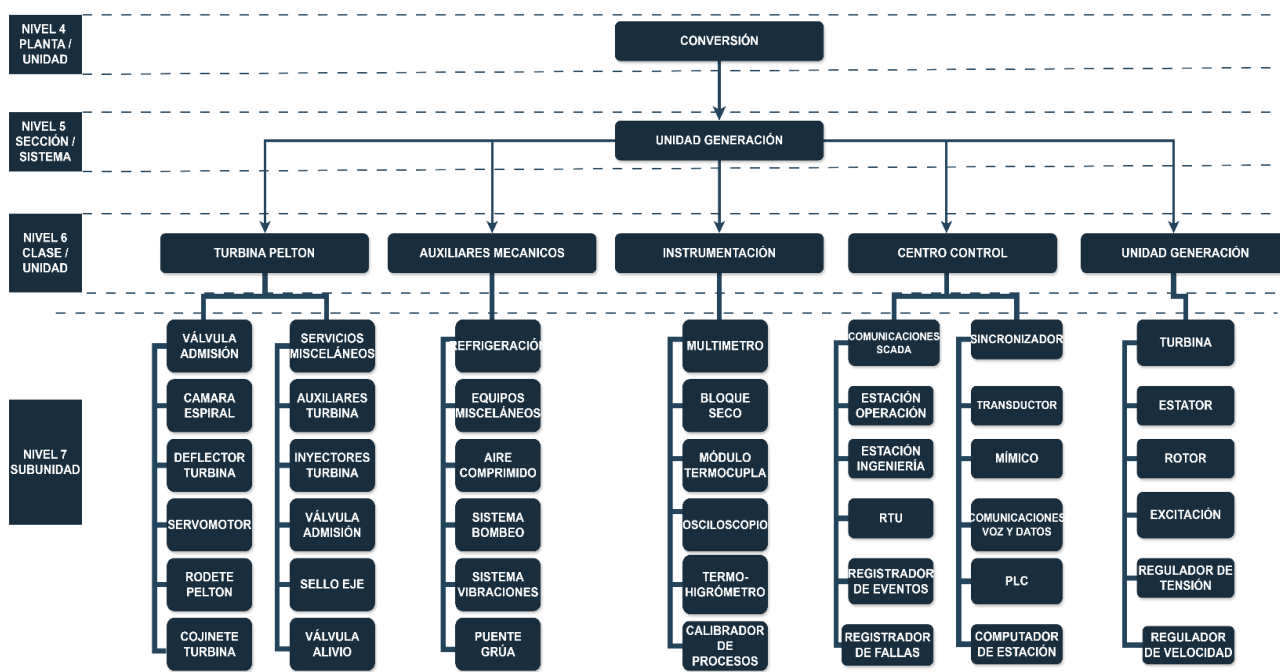
Después del proceso de generación de energía en la central, se llevan desde el tanque de carga situado a la salida de la central Niquía, a través de una conducción de 4,1 kilómetros de longitud y 1,6 m de diámetro, por gravedad, a la planta de tratamiento Manantiales, con capacidad de 6,09 m³/seg. que significan 500 millones de litros adicionales de agua pura por día para el sistema de acueducto de EPM. Actualmente la central Niquía, al igual que La Tasajera, recibe las aguas del embalse Riogrande II, aprovechando una caída bruta de 420,5 metros y un caudal de 6,09 m³/seg.

3.1 Caracterización de Componentes y Fallas


Se utiliza una estructura jerárquica basada en el modelo de la norma ISO 14224 (Predictiva 21, s. f.) y sus 9 niveles de jerarquía para describir la estructura de la etapa de conversión del proceso generación de energía tal como se muestra en la figura 4:

Figura 4

Jerarquía etapa conversión energía



Nota. Elaboración propia (2025).

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO ESPECIALIZACIÓN TIPO ARTÍCULO DEPARTAMENTO DE MECATRÓNICA Y ELECTROMECAÁNICA	Código	FDE 283
		Versión	01
		Fecha	14-10-2025

La caracterización de los componentes críticos de la central hidroeléctrica Niquia se orienta a identificar aquellos equipos con mayores tasas de falla y mayor impacto en la disponibilidad de la planta. Este proceso permite identificar los activos críticos, sus modos de falla, causas y consecuencias, con base en los registros históricos de mantenimiento, fallas y operación.

Los datos presentados en la Tabla 2 provienen del registro histórico de datos de mantenimiento, fallas y operación de la central Niquía, que consolida información proveniente de los sistemas de gestión de activos, reportes de operación y bitácoras técnicas de mantenimiento.

Tabla 2
Caracterización por sistema

Subsistema	Fallas	MTTR_h	Horas_out	MTBF_h	λ	μ	A
AUXILIARES ELECTRICOS	2	2.525	5.050	20170.708	0.000050	0.396040	0.999874
BAHIA SUBESTACIÓN	1	22.817	22.817	40341.417	0.000025	0.043831	0.999432
CENTRO CONTROL MOTORES	1	7.067	7.067	40341.417	0.000025	0.141538	0.999823
GENERADOR	35	4.016	140.567	1152.612	0.000868	0.249002	0.996522
SERVICIOS AUXILIARES GENERADOR	2	0.700	1.400	20170.708	0.000050	1.428571	0.999965
TURBINA	2	3.383	6.767	20170.708	0.000050	0.295681	0.999831
EXITACIÓN	14	4.815	67.416	2881.529	0.000347	0.207641	0.998330
REFRIGERACIÓN	2	0.891	1.783	20170.708	0.000050	1.122330	0.999956
REGULADOR DE VELOCIDAD	1	5.516	5.516	40341.417	0.000025	0.181234	0.999863

Nota. Elaboración propia (2025).

λ y μ calculados directamente de MTBF y MTTR (en horas).

Fallas alto + MTTR alto: sistema crítico por frecuencia y duración.


Horas_out alto + Fallas bajo: pocas fallas, pero muy largas, candidatos a rediseño / mayor intervención.

λ alto: confiabilidad baja (fallas más seguidas).

μ bajo: mantenibilidad deficiente (reparaciones lentas).

El Generador y el sistema de excitación concentran el 81.6 % de las fallas, evidenciando que las estrategias de mantenimiento deben centrarse en estos subsistemas. El total de fallas es de 60 (dos subsistemas concentran la mayor parte):

- GENERADOR: 35 fallas (58.3 %), 140.6 h fuera. MTTR 4.016 h, 140.6 h fuera, A \approx 0.997

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO ESPECIALIZACIÓN TIPO ARTÍCULO DEPARTAMENTO DE MECATRÓNICA Y ELECTROMECAÁNICA	Código	FDE 283
		Versión	01
		Fecha	14-10-2025

- **EXCITACIÓN:** 14 fallas (23.3 %), 67.4 h fuera. MTTR 4.82 h, 67.4 h fuera, $A \approx 0.998$

Fallas seguidas: Alta tasa de falla (λ elevado)

Cuando un equipo falla con mucha frecuencia, los intervalos entre fallas (MTBF) son cortos. Esto se traduce en un λ (lambda) alto, ya que:

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

donde MTBF (Mean Time Between Failures) = promedio de horas que el equipo opera antes de volver a fallar.

Esto implica que el equipo pierde confiabilidad, porque no logra mantenerse operativo durante largos periodos. Puede deberse a modos de falla repetitivos no resueltos, mantenimiento reactivo sin eliminación de la causa raíz, diseño o instalación deficiente o repuestos de baja calidad o incompatibles.

Ejemplo:

Generador: 35 fallas en 1.152 h, $MTBF \approx 33$ h

$$\lambda = \frac{1}{33} = 0.0303 \text{ fallas/h}$$

Es decir, una falla cada ~33 horas, es un comportamiento de baja confiabilidad.

Reparaciones lentas: Baja tasa de reparación (μ bajo)

Se refiere a equipos que, una vez fallan, tardan mucho en ser reparados o recuperados.

$$\mu = \frac{1}{MTTR}$$

donde MTTR (Mean Time To Repair) = promedio de horas necesarias para reparar el equipo.


Esto evidencia la baja mantenibilidad, es decir, el sistema tarda mucho en volver a servicio, puede deberse a diagnóstico lento o falta de procedimientos estandarizados, escasez de repuestos o herramientas, dependencia de técnicos externos o servicios de terceros o accesos físicos complicados o permisos operativos demorados.

Ejemplo:

Bahía de subestación: $MTTR = 22.8$ h

$$\mu = \frac{1}{22.8} = 0.044 \text{ reparaciones/h}$$

Es decir, baja mantenibilidad, cada reparación dura casi un día completo.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO ESPECIALIZACIÓN TIPO ARTÍCULO DEPARTAMENTO DE MECATRÓNICA Y ELECTROMECAÁNICA	Código	FDE 283
		Versión	01
		Fecha	14-10-2025

El análisis de criticidad es una técnica de fácil comprensión y manejo, en la cual se establecen rangos relativos de riesgos que se representan por las probabilidades y/o frecuencias de eventos y sus consecuencias. La matriz de criticidad por su parte es una herramienta utilizada para clasificar y visualizar la criticidad, mediante la definición de categorías de consecuencia y de su probabilidad. Para realizar el análisis, se utiliza la matriz de riesgos del grupo EPM (ver Tabla 3), que es una matriz (5x5) diseñada a base de un código de colores que denotan la menor o mayor intensidad del riesgo relacionado con cada uno de los activos a ser evaluados.

En un eje horizontal se representa la probabilidad de las fallas y en el vertical los impactos o consecuencias en los cuales incurrirá el activo en estudio. Al momento de evaluar el evento de falla, entendiendo la falla como pérdida de la función principal; es necesario cuantificar las probabilidades de ocurrencia y las consecuencias en cada uno de los cinco escenarios.

Tabla 3
Matriz de riesgos.

PROBABILIDAD		CONSECUENCIA				
		Mínima	Menor	Moderada	Mayor	Máxima
Muy alta	5	5	10	20	40	80
Alta	4	4	8	16	32	64
Media	3	3	6	12	24	48
Baja	2	2	4	8	16	32
Muy baja	1	1	2	4	8	16
		1	2	4	8	16

Nota. Elaboración propia (2025).


La evaluación de las consecuencias determina el efecto que puede generar el evento de falla funcional del activo sobre los 5 objetos de impacto a evaluar (personas, ambiental, calidad, reputación y financiero).

La severidad de los impactos está valorada numéricamente en un rango de 1 a 16 (matriz de riesgos), siendo el valor 1 el nivel de consecuencia mínimo y 16 el nivel de consecuencia máximo.

El nivel de criticidad en el cual se encuentra categorizado cada activo es dado por el resultado más alto entre los cinco impactos evaluados, el grado de criticidad resultante es un nivel cualitativo con definiciones (Bajo, Medio, Alto y muy Alto).

Los activos con resultados Alto y Muy Alto deben ser considerados para una posterior evaluación y planificación de controles que permitan disminuir esta criticidad.

La información empleada en este estudio utiliza los datos históricos de eventos que han causado indisponibilidad parcial o total en la central hidroeléctrica Niquía, constituyendo la fuente primaria para la identificación de modos de falla y la evaluación de la criticidad de los componentes, además se incluye una tabla resumen donde se visualiza el componente, su índice de criticidad y su modo de falla más representativo (ver Tabla 4). Este insumo resulta fundamental para entender el desarrollo del análisis de


	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO ESPECIALIZACIÓN TIPO ARTÍCULO DEPARTAMENTO DE MECATRÓNICA Y ELECTROMECAÁNICA	Código	FDE 283
		Versión	01
		Fecha	14-10-2025

Confiabilidad, Mantenibilidad y Disponibilidad (CMD), orientado a establecer estrategias de mejora de la disponibilidad operativa.

Tabla 4

Clasificación de componentes mediante matriz de criticidad.

COMPONENTE	INDICE CRITICIDAD	MODO FALLA CRÍTICO
AUXILIARES ELECTRICOS C/M NQ	48	CORTOCIRCUITO
SERVICIOS AUXILIARES 480VAC NQ	48	CORTOCIRCUITO
SISTEMA CONTRA INCENDIO NQ	40	FALLAS INTERNAS DEL HARDWARE
PROTECCIONES MEDIDAS GENERADOR U1 NQ	40	FALLAS INTERNAS DEL RELE
INTERRUPTOR CAMPO U1 NQ	42	CONTACTOS MOVILES FUNDIDOS
BANCO CILINDROS CO2 GEN NQ	60	CILINDRO NO ACTUA POR PERDIDA DE CONTENIDO
PUENTE GRUA C/M NQ	80	FALLA CONTROL
CABLE AISLADO SALIDA ESTA U1 NQ	24	FALLA A TIERRA QUE DAÑE EL AISLAMIENTO.
TRANSFORMADOR DE POTENCIA, 22,0 MVA, 3F	64	DAÑOS EN EL NÚCLEO O BOBINA POR CORTOCIRCUITO O PERDIDA DE AISLAMIENTO
INTERRUPTOR 44 LINEA BELLO NQ	32	FALLA MECÁNICA Y PERDIDA DE MEDIO AISLANTE
REJAS COLADERAS 2 CAPTACION NQ	32	ROTURA POR OXIDACIÓN
VALVULA CONDUCCION NQ	24	FALLA EL SISTEMA HIDRAULICO
ESTATOR GENERADOR U1 NQ	40	DAÑO DEL NUCLEO POR CORTOCIRCUITO
ROTOR GENERADOR U1 NQ	32	FALLA EN EL NUCLEO DEL ROTOR O EN LOS POLOS POR CORTOCIRCUITO
PTS MEDIDA GEN U1 NQ	20	APERTURA DE LA BOBINA POR CORTOCIRCUITO
NEUTRO TIERRA U1 NQ	20	CORTOCIRCUITO EN EL TRANSFORMADOR DEL NEUTRO

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO ESPECIALIZACIÓN TIPO ARTÍCULO DEPARTAMENTO DE MECATRÓNICA Y ELECTROMECAÁNICA	Código	FDE 283
		Versión	01
		Fecha	14-10-2025

REGULADOR TENSION U1 NQ

40

FALLA POR CORTOCIRCUITO

Nota. Elaboración propia (2025).

El análisis de criticidad evidencia que el puente grúa constituye el componente más crítico de la central, con un índice de 80 asociado a fallas en el sistema de control. Su indisponibilidad detiene por completo las maniobras de izaje y los mantenimientos mayores, generando extensas indisponibilidades operativas. Por ello, se recomienda priorizar la ejecución de pruebas funcionales, asegurar la disponibilidad de repuestos para los variadores y sistemas de control, y establecer un plan de contingencia que permita mantener la continuidad de los trabajos en caso de falla. En segundo lugar, el transformador de potencia de 22 MVA presenta un riesgo elevado debido a la posibilidad de daños en el núcleo o las bobinas, los cuales pueden derivar en paradas prolongadas y costos significativos de reparación. Este equipo requiere un seguimiento permanente mediante ensayos dieléctricos (DGA, tangente delta, FRA), inspecciones termográficas y una adecuada coordinación de protecciones, junto con la verificación del inventario de repuestos críticos como bujes y relés.


El banco de cilindros de CO₂ del generador, con un índice de criticidad de 60, se considera un elemento clave para la seguridad del sistema, ya que una pérdida de contenido comprometería la capacidad de respuesta ante incendios. En consecuencia, es indispensable mantener rutinas de pesaje, inspecciones periódicas, pruebas de estanqueidad y garantizar la existencia de cilindros de reemplazo disponibles en planta. Asimismo, el interruptor de campo de la unidad U1 con un índice de 42 representa otro componente crítico, pues una falla en los contactos móviles puede provocar la salida intempestiva del generador. Para mitigar este riesgo se recomienda implementar mediciones regulares de resistencia de contacto, mantenimiento preventivo del mecanismo de cierre y apertura, y disponer de repuestos en inventario.

En conjunto, la atención prioritaria de estos activos (puente grúa, transformador de potencia, banco de CO₂ e interruptor de campo) permitiría abordar la mayor parte del riesgo técnico y operativo de la central, reduciendo tanto la probabilidad de falla como los tiempos de indisponibilidad. La integración de la matriz de criticidad con los parámetros de mantenibilidad (MTTR) y los modelos de confiabilidad basados en distribuciones Weibull genera una línea base cuantitativa de indisponibilidad, la cual se incorpora al diagrama de bloques de confiabilidad (RBD) para simular configuraciones y estrategias de mantenimiento. De esta forma, se obtiene una trazabilidad directa entre cada componente y su impacto sobre la disponibilidad total, proporcionando una herramienta robusta para priorizar inspecciones, pruebas, gestión de repuestos y reducción de tiempos de reparación en futuras intervenciones.

3.2 Tratamiento y Transformación de Datos

El tratamiento y transformación de datos constituyen la base fundamental para el desarrollo del modelo RAM aplicado a la PCH Niquía, particularmente en la etapa de ajuste de distribuciones Weibull y la simulación de escenarios de disponibilidad.

El proceso busca garantizar que los datos históricos de fallas y mantenimientos registrados en los sistemas operativos de EPM entre 2020 y 2024, se conviertan en información estadísticamente robusta y confiable, apta para modelar el comportamiento real de los activos críticos.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO ESPECIALIZACIÓN TIPO ARTÍCULO DEPARTAMENTO DE MECATRÓNICA Y ELECTROMECAÁNICA	Código	FDE 283
		Versión	01
		Fecha	14-10-2025

En esta fase se implementó un proceso integral de depuración, estructuración y parametrización, desarrollado en tres niveles:

3.2.1 Nivel 1 Estandarización y normalización temporal:

En esta fase los registros originales contenían variaciones en formato, nomenclatura y precisión temporal, se unificaron los campos Fecha Inicio, Fecha Fin y Duración, calculando duraciones cuando era necesario. Se eliminaron registros con duraciones incoherentes ($\leq 0h$) y se completan intervalos faltantes, se estableció una ventana de análisis 2020 – 2024 (ver Tabla 5).

Tabla 5

Resumen clasificación de componentes por modo de falla y duración.

COMPONENTE	MODO FALLA	UNIDAD	FECHA INICIO	FECHA FIN	DURACIÓN
TRANSFORMADOR AUX. 1	FUGA ACEITE EN RADIADOR	NIQUÍA 1	2020-01-15 03:45:00	2020-05-12 09:20:00	10.75
TRANSFORMADOR AUX.2	FALLA TERMICA	NIQUÍA 1	2020-02-20 08:10:00	2020-05-12 09:20:00	8.83
GENERADOR	FALLA AISLAMIENTO	NIQUÍA 1	2020-03-10 01:00:00	2020-03-10 23:00:00	22.00
TURBINA	OBSTRUCCIÓN EN INYECTOR	NIQUÍA 1	2020-04-05 06:30:00	2020-04-05 12:30:00	6.00
SISTEMA DE EXITACIÓN	DESBALANCEO EN REGULADOR	NIQUÍA 1	2020-05-12 09:20:00	2020-05-12 13:45:00	4.42

Nota. Elaboración propia (2025).


3.2.2 Nivel 2 Categorización jerárquica y consolidación de modos de falla:

En esta fase los datos fueron organizados por componente y modo de falla, permitiendo identificar los eventos homogéneos sobre los cuales se estimaron los parámetros de confiabilidad, cada evento fue asignado a una categoría única, evitando duplicidades y ambigüedades, esta estructura sirvió como base para calcular los indicadores de desempeño (MTBF, MTTR, λ y μ) y alimentar los modelos probabilísticos (ver Tabla 6).

Tabla 6

Resumen clasificación de componentes por indicadores de desempeño.

Componentes	Modo de Falla	Fallas	MTTR_h	Horas_out	MTBF_h	λ	μ
EXCITACIÓN	Alta Temperatura Puente Tiristores G31	1	0.75	0.75	40341.4167	0.000025	1.3333
EXCITACIÓN	Alta Temperatura Puente Tiristores G32	1	0.35	0.35	40341.4167	0.000025	2.8571
EXCITACIÓN	Falla Bobina de Cierre	1	5.3333	5.3333	40341.4167	0.000025	0.1875

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO ESPECIALIZACIÓN TIPO ARTÍCULO DEPARTAMENTO DE MECATRÓNICA Y ELECTROMECAÁNICA						Código	FDE 283
							Versión	01
							Fecha	14-10-2025

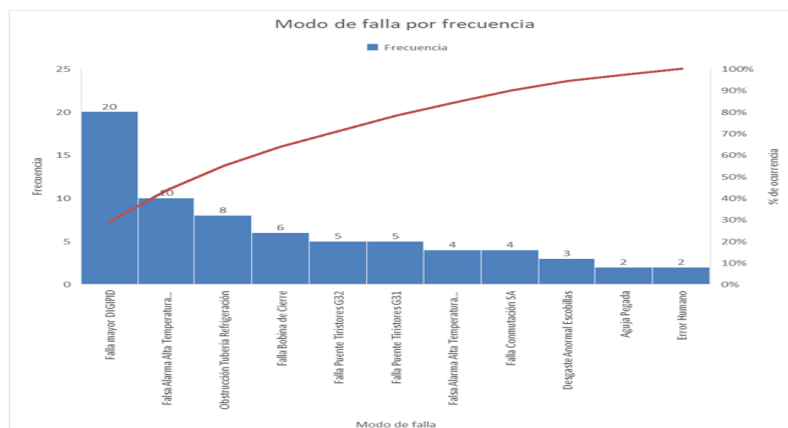
EXCITACIÓN	Falla Guardamotor Puente Tiristores G31	1	10.0	10.0	40341.4167	0.000025	0.1
EXCITACIÓN	Falla Puente Tiristores G31	4	1.05	4.2	10085.3542	0.000099	0.9524
EXCITACIÓN	Falla Puente Tiristores G32	5	8.6833	43.4167	8068.2833	0.000124	0.1152
EXCITACIÓN	Falla Ventilador Puente Tiristores G32	1	3.3667	3.3667	40341.4167	0.000025	0.297
REFRIGERACIÓN	Fuga Agua Torre Enfriamiento	1	1.2333	1.2333	40341.4167	0.000025	0.8108
REFRIGERACIÓN	Válvula Ingreso Cerrada	1	0.55	0.55	40341.4167	0.000025	1.8182
REGULADOR DE VELOCIDAD	Falla Motobomba	1	5.5167	5.5167	40341.4167	0.000025	0.1813

Nota. Elaboración propia (2025).


Para determinar cuáles modos de falla ocurren con mayor frecuencia, se elaboró un diagrama de Pareto que clasifica los eventos según su frecuencia de aparición (ver Figura 5). Esta herramienta permite visualizar como una cantidad limitada de modos representa un porcentaje significativo del total de fallas registradas. El análisis evidencio que un grupo reducido de modos concentra más del 80% de los eventos reportados en la central Niquía durante el periodo analizado. Esta información resulta crucial para enfocar acciones de mantenimiento correctivo y preventivo sobre los fallos más repetitivos.

Figura 5

Diagrama de Pareto para modo de falla por frecuencia.



Nota. Elaboración propia (2025).

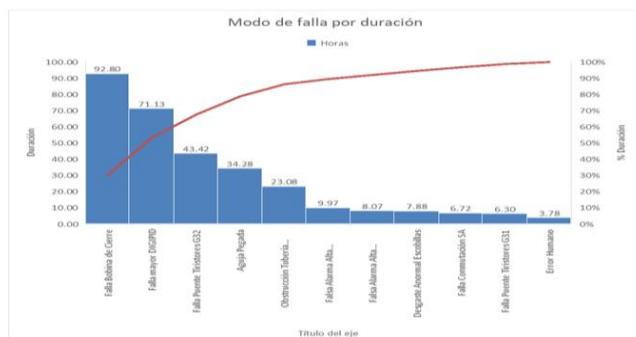
	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO ESPECIALIZACIÓN TIPO ARTÍCULO DEPARTAMENTO DE MECATRÓNICA Y ELECTROMECAÁNICA	Código	FDE 283
		Versión	01
		Fecha	14-10-2025

El diagrama de Pareto de frecuencia permite identificar los modos de falla más recurrentes en la central Niquiá. El análisis muestra que un grupo reducido de causas concentra la mayor parte de las ocurrencias, evidenciando el principio 80/20 típico de la confiabilidad industrial.


El modo “Falla mayor DIGIPID” se presenta como el evento de mayor recurrencia, con un total de 20 incidencias registradas durante el periodo de análisis. Este tipo de falla corresponde a anomalías en el módulo de control digital de regulación PID (DIGIPID), encargado de gestionar las variables operativas de la unidad como tensión, corriente y velocidad de la excitación, mediante algoritmos de control proporcional-integral-derivativo. Cualquier desviación, bloqueo lógico o error de comunicación en este sistema puede generar alarmas falsas, pérdida de referencia o incluso disparos no programados del generador, afectando directamente la confiabilidad global del proceso. Le siguen en frecuencia las “Falsas alarmas por alta temperatura” (10 eventos), la “Obstrucción en la tubería de refrigeración” (8 eventos), la “Falla en la bobina de cierre” (6 eventos) y las “Fallas en el puente de tiristores” (5 eventos). En conjunto, estos cinco modos de falla concentran cerca del 80 % del total de eventos registrados, lo que confirma que los esfuerzos de mantenimiento deben enfocarse en el mejoramiento de los sistemas de automatización y control de temperatura, así como en la limpieza y verificación periódica del sistema hidráulico de refrigeración, dado su impacto directo sobre la confiabilidad y disponibilidad de la unidad de generación. En síntesis, el Pareto confirma que la mayor parte de los eventos repetitivos proviene de problemas de control y refrigeración, áreas donde intervenciones de tipo predictivo y preventivo (monitoreo de alarmas, calibraciones, limpieza de filtros y sensores) ofrecen un alto retorno en confiabilidad.

Además de la frecuencia, es indispensable evaluar el impacto operativo de cada modo de falla en términos de tiempo total de indisponibilidad (ver Figura 6). Para ello, se construyó un segundo diagrama de Pareto, esta vez ordenando los modos de falla según el número de horas acumuladas fuera de servicio. Esta visualización permite identificar aquellas fallas que, aunque menos frecuentes, generan pérdidas significativas de disponibilidad. El análisis arrojó que ciertos modos críticos, como las falla bobina de cierre (en la Figura 5 con 6 eventos ocurridos), tienen un peso considerable en la duración total de las paradas (en la Figura 6, con 92,80 horas de indisponibilidad), lo cual los convierte en candidatos prioritarios para acciones de mejora y rediseño.

Figura 6
Diagrama de Pareto para modo de falla por duración.



Nota. Elaboración propia (2025).

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO ESPECIALIZACIÓN TIPO ARTÍCULO DEPARTAMENTO DE MECATRÓNICA Y ELECTROMECAÁNICA	Código	FDE 283
		Versión	01
		Fecha	14-10-2025

3.2.3 Nivel 3 transformación probabilística y simulación Weibull:

En esta fase ya con los datos depurados, se aplicó un ajuste de distribución Weibull de dos parámetros (β , η) a las duraciones entre fallas para cada modo representativo, el parámetro β (forma) permitió identificar el régimen de falla: aleatorio ($\beta \approx 1$), desgaste progresivo ($\beta > 1$) o infantil ($\beta < 1$).

El parámetro η (escala) determino el tiempo característico de vida del componente, asociado al 63,2 % de probabilidad acumulada de falla.


La tabla de parámetros Weibull por modo de falla (ver Tabla 7) sintetiza los resultados del ajuste de una distribución Weibull de dos parámetros (β , η) aplicado a los tiempos entre fallas de cada modo representativo de la PCH Niquía.

Tabla 7

Parámetros Weibull por modo de falla.

Modo de falla	n_interarrivals	β	η	R2_ajuste
Falla mayor DIGIPID	18	0.75302	1822.15145	0.89388
Falsa Alarma Alta Temperatura Cojinete Superior	8	0.67093	3133.88373	0.97733
Obstrucción Tubería Refrigeración	7	1.28745	11206.14168	0.98740
Falla Puente Tiristores G32	4	0.46528	2605.78801	0.84794
Falla Bobina de Cierre	3	0.88947	1936.77761	0.97457
Falsa Alarma Alta Temperatura Cojinete de Turbina	3	0.66240	2067.52925	0.83105
Falla Puente Tiristores G31	3	0.56954	4143.47654	0.75092
Falla Conmutación SA	3	0.53999	7168.58403	0.86435
Desgaste Anormal Escobillas	2	1.69142	22829.58224	1.00000

Nota. Elaboración propia (2025).

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO ESPECIALIZACIÓN TIPO ARTÍCULO DEPARTAMENTO DE MECATRÓNICA Y ELECTROMECAÁNICA	Código	FDE 283
		Versión	01
		Fecha	14-10-2025

El análisis de los parámetros obtenidos mediante el ajuste de la distribución de Weibull evidencia que, en la mayoría de los modos de falla, el parámetro de forma β presenta valores inferiores a 1, lo cual indica la presencia de fallas de tipo infantil o aleatorio. Este comportamiento se asocia generalmente con deficiencias en los procesos de puesta en servicio, calibración o mantenimiento preventivo, más que con fenómenos de desgaste por envejecimiento. En términos prácticos, estos resultados sugieren que muchos de los eventos registrados corresponden a problemas iniciales o fallas fortuitas, y no a degradación natural de los componentes.

En este contexto, el parámetro β (beta) determina el régimen de falla del componente: cuando $\beta < 1$, predominan las fallas infantiles, propias de defectos de fabricación, instalación o ajuste; si $\beta \approx 1$, las fallas se consideran aleatorias, sin tendencia al desgaste; y cuando $\beta > 1$, se evidencia un patrón de falla por desgaste progresivo, característico de procesos de envejecimiento o degradación acumulada. Por su parte, el parámetro de escala η (eta), expresado en horas, representa el tiempo característico de vida del componente, es decir, el punto en el que la probabilidad acumulada de falla alcanza el 63,2 %, y constituye un indicador clave de la vida útil media bajo condiciones normales de operación.

El ajuste estadístico del modelo se evalúa mediante el coeficiente de determinación R^2 , que mide la bondad del ajuste entre los datos empíricos y la función de Weibull; valores cercanos a 1 reflejan un modelo representativo y confiable. Finalmente, el parámetro $n_{\text{intervalos}}$ corresponde al número de intervalos entre fallas válidos utilizados para el ajuste, definiendo el tamaño de muestra y, por tanto, la robustez estadística del análisis. En conjunto, estos parámetros permiten caracterizar de forma cuantitativa el comportamiento de falla de cada componente y constituyen la base para la simulación de escenarios de confiabilidad y disponibilidad.

Con base en los parámetros β y η obtenidos, se construyeron las curvas $R(t)$ que permiten visualizar la confiabilidad temporal de cada modo de falla, aportando una herramienta práctica para la programación del mantenimiento.

3.3 Análisis de resultados y elaboración de recomendaciones a la estrategia de mantenimiento

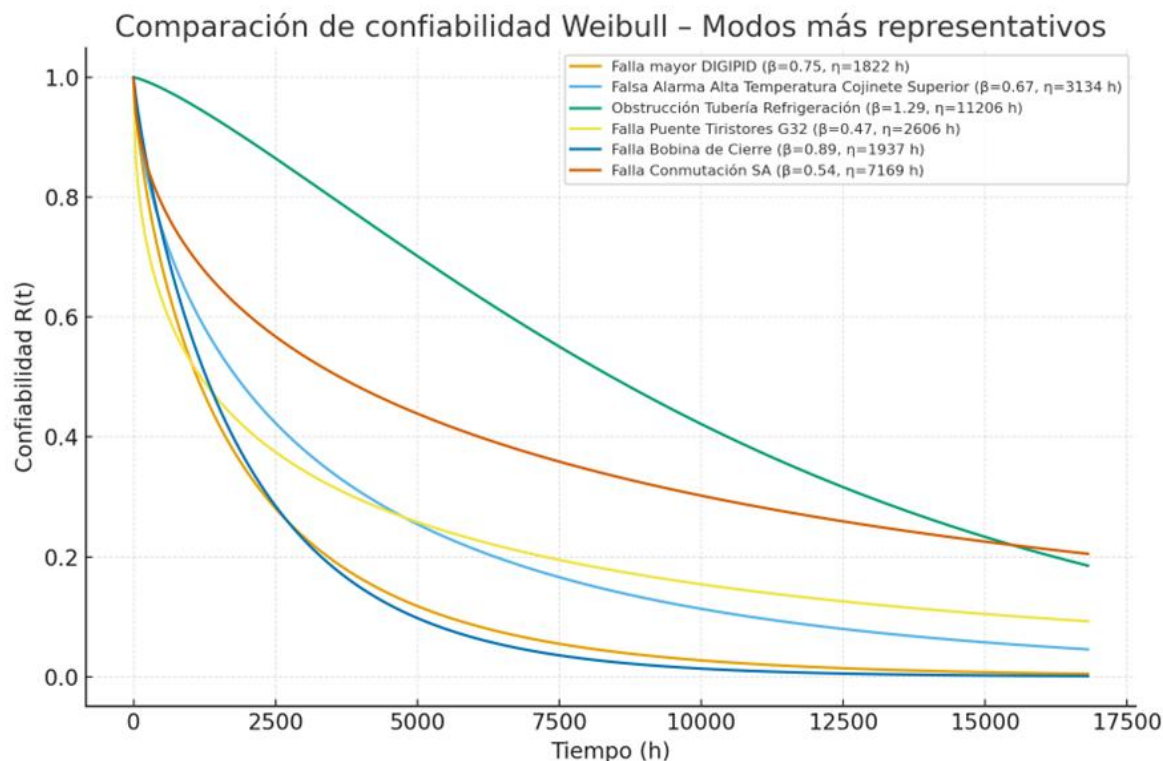
A partir de los parámetros Weibull obtenidos, se construyeron las curvas de confiabilidad $R(t)$ para cada modo de falla representativo, estas curvas representan la probabilidad de que el componente funcione sin fallar hasta un tiempo t , y constituyen una herramienta clave para la simulación de escenarios de mantenimiento.

Interpretación de las curvas $R(t)$:

Pendiente de la curva, indica la velocidad con la que disminuye la confiabilidad, una curva más empinada (β alto) refleja mayor desgaste.

Desplazamiento horizontal (η): refleja la vida útil media, un η alto significa mayor confiabilidad inicial y vida prolongada (ver Figura 7).

Figura 7
Curvas $R(t)$ por modo de falla.




Nota. Elaboración propia (2025)

Las curvas $R(t)$ generadas para los modos más representativos se integran en el modelo de simulación de disponibilidad de la central Niquía, donde sirven como base para definir los intervalos de intervención óptimos, calcular tasas de falla $\lambda(t)$ y tasas de reparación $\mu(t)$ dependientes del tiempo, además de simular escenarios con distintas estrategias de mantenimiento y evaluar su impacto sobre la disponibilidad (A) y el **MTBF** global.

La Figura 7, presenta la evolución de la confiabilidad $R(t)$ para los modos de falla más representativos de la central hidroeléctrica Niquía, calculada mediante el ajuste de una distribución Weibull de dos parámetros (β , η) a los tiempos entre fallas históricos. Cada curva describe la probabilidad de que el componente continúe operativo hasta un tiempo t sin presentar fallas, permitiendo diferenciar los comportamientos de tipo infantil, aleatorio o de desgaste progresivo.

El modo “Falla mayor DIGIPID” ($\beta = 0,75$; $\eta = 1822$ h) evidencia un patrón de falla temprana, donde la probabilidad de falla es mayor al inicio del ciclo de operación y disminuye posteriormente. Este comportamiento sugiere deficiencias de configuración, calibración o firmware en el sistema de control, que podrían mitigarse mediante pruebas funcionales periódicas y redundancia de señal.

La “Falsa alarma por alta temperatura de cojinetes superiores” ($\beta = 0,67$; $\eta = 3134$ h) presenta un régimen similar de fallas prematuras, asociado a umbrales de disparo inadecuados o sensores mal calibrados. La

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO ESPECIALIZACIÓN TIPO ARTÍCULO DEPARTAMENTO DE MECATRÓNICA Y ELECTROMECAÁNICA	Código	FDE 283
		Versión	01
		Fecha	14-10-2025

implementación de un programa de verificación predictiva de instrumentación térmica permitiría reducir su recurrencia.

En contraste, la “Obstrucción en la tubería de refrigeración” ($\beta = 1,29$; $\eta = 11\ 206$ h) muestra un comportamiento de desgaste progresivo ($\beta > 1$), típico de procesos acumulativos como la formación de sedimentos o incrustaciones. Su confiabilidad disminuye lentamente, lo que indica una vida útil prolongada pero dependiente del mantenimiento preventivo y la limpieza periódica del sistema hidráulico.

Las “Fallas en el puente de tiristores G32” ($\beta = 0,47$; $\eta = 2606$ h) y la “Falla en la bobina de cierre” ($\beta = 0,89$; $\eta = 1937$ h) corresponden a comportamientos aleatorios ($\beta \approx 1$), en los cuales la probabilidad de falla se mantiene constante en el tiempo. En el caso de los tiristores, se asocian a defectos de componentes electrónicos o fluctuaciones térmicas, mientras que en la bobina de cierre responden a desgaste electromecánico. En ambos casos se recomienda sustitución preventiva basada en ciclos de maniobra y control térmico en los gabinetes eléctricos.


Por último, la “Falla de conmutación SA” ($\beta = 0,54$; $\eta = 7169$ h) presenta una confiabilidad intermedia con eventos impredecibles, propios de fallas lógicas o de comunicación en sistemas electrónicos. Es aconsejable reforzar los planes de mantenimiento predictivo sobre las tarjetas de control y revisar la inmunidad electromagnética de los lazos de señal.

En términos generales, la mayoría de los modos evaluados presentan valores $\beta < 1$, lo que indica una predominancia de fallas de tipo infantil o aleatorio. Este resultado sugiere que la confiabilidad global del sistema depende en mayor medida de la calidad de montaje, calibración y mantenimiento inicial, que del envejecimiento natural de los equipos. Solo el modo asociado a la obstrucción del sistema de refrigeración exhibe un patrón claro de desgaste acumulativo. Por tanto, las estrategias de mejora deben enfocarse en el fortalecimiento de los procedimientos de puesta en servicio, calibración de sensores y monitoreo predictivo de sistemas electrónicos e hidráulicos, con el fin de incrementar la confiabilidad y disponibilidad global de la unidad de generación.

4. DISCUSIÓN

El análisis de confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad (RAM) aplicado a la central hidroeléctrica Niquía permitió identificar con precisión los subsistemas y componentes críticos que condicionan la continuidad operativa de la unidad de generación. Los resultados obtenidos evidencian la coherencia entre los patrones de falla detectados en los registros históricos y los comportamientos esperados de acuerdo con la literatura especializada sobre centrales de pequeña escala (Bulut, 2021; Osman et al., 2022; Ríos Velásquez et al., 2024).

Los diagramas de Pareto (frecuencia y duración) demostraron que un número reducido de modos de falla, principalmente asociados al generador, el sistema de excitación y el control de temperatura, concentran más del 80 % de los eventos registrados durante el periodo analizado (2020 – 2024). Este hallazgo confirma el principio de Pareto aplicado al mantenimiento industrial, según el cual un grupo limitado de causas domina el comportamiento global de confiabilidad. En el caso de Niquía, la alta frecuencia de fallas en el sistema de control (DIGIPID) y las alarmas de temperatura indican la necesidad de fortalecer los procesos de verificación, calibración e instrumentación, así como la implementación de monitoreo predictivo en variables críticas.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO ESPECIALIZACIÓN TIPO ARTÍCULO DEPARTAMENTO DE MECATRÓNICA Y ELECTROMECAÁNICA	Código	FDE 283
		Versión	01
		Fecha	14-10-2025


Por otro lado, el análisis por subsistemas (Tabla 2) reveló que el generador y la excitación representan los mayores contribuyentes tanto en frecuencia como en horas fuera de servicio, acumulando más del 81 % de las indisponibilidades. Esta concentración de fallas es coherente con lo reportado por Martínez et al. (2020) en plantas hidroeléctricas de similar capacidad, donde los sistemas electromecánicos principales presentan los mayores desafíos de mantenibilidad. Las causas más frecuentes —cortocircuitos, sobrecalentamientos y fallas de tarjetas electrónicas— corresponden a modos de falla típicos de envejecimiento acelerado o deficiente protección térmica. Por tanto, los resultados respaldan la necesidad de establecer protocolos de diagnóstico rápido, mejorar la disponibilidad de repuestos críticos y actualizar la estrategia de mantenimiento preventivo basada en confiabilidad (RCM).

El ajuste de distribución Weibull (Tabla 7) permitió cuantificar el comportamiento estadístico de los modos de falla y clasificarlos según su régimen de ocurrencia. La mayoría de los modos presentaron valores de β inferiores a 1, lo que indica fallas aleatorias o de tipo infantil. Esto sugiere que las deficiencias no están asociadas a desgaste natural sino a problemas de calidad en instalación, calibración o puesta en marcha. Este patrón ha sido documentado por Osman et al. (2022), quienes asocian $\beta < 1$ con equipos electrónicos o de control en los que la variabilidad de componentes y las perturbaciones externas afectan la confiabilidad inicial. Solo algunos modos como la obstrucción en la tubería de refrigeración ($\beta = 1,29$) mostraron un régimen de desgaste progresivo, típico de elementos expuestos a ensuciamiento o degradación hidráulica, confirmando la validez del modelo aplicado.

Las curvas de confiabilidad $R(t)$ presentadas en la Figura 7, muestran que los componentes más críticos de la central presentan una disminución acelerada de confiabilidad durante las primeras 2.000 a 3.000 horas de operación, lo que confirma la necesidad de fortalecer las rutinas de mantenimiento preventivo y predictivo en las etapas iniciales de servicio. En particular, se recomienda implementar programas de inspección temprana, calibración de sensores, verificación de lazos de control y análisis de tendencias mediante monitoreo de condición, con el fin de detectar desviaciones antes de que evolucionen a fallas funcionales. Estos resultados concuerdan con los hallazgos de García y Romero (2024), quienes evidenciaron que la calibración inicial adecuada y la verificación periódica de instrumentos reducen significativamente la incidencia de fallas tempranas en equipos de generación eléctrica.

Por su parte, los sistemas hidráulicos mantienen niveles elevados de confiabilidad en los primeros periodos operativos, pero muestran un descenso progresivo asociado a la acumulación de sedimentos, obstrucciones o degradación de sellos y empaques. Este comportamiento resalta la importancia de establecer rutinas sistemáticas de mantenimiento preventivo, centradas en limpieza de canales, control de filtraciones y sustitución programada de elementos de sellado, complementadas con diagnósticos predictivos basados en análisis de vibraciones, caudales y presión. En conjunto, estas acciones permiten prolongar la vida útil de los componentes y sostener la disponibilidad global de la planta.

El modelo de bloques de confiabilidad (RBD) permitió visualizar las interdependencias funcionales entre los subsistemas principales turbina, generador, excitación, transformador y bahía de salida y cuantificar el efecto de una falla individual sobre la disponibilidad global. El modelo confirmó que el sistema opera bajo una configuración en serie, en la cual la falla de un solo componente detiene completamente la generación. Esto explica por qué la disponibilidad global $A \approx 0,997$ depende fuertemente de la reducción del MTTR en los componentes más críticos. Escenarios de simulación mostraron que una disminución del 15 al 20 % en el MTTR de generador y excitación puede traducirse en una mejora de 1 a 2 puntos porcentuales en la disponibilidad total, coherente con las proyecciones planteadas.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO ESPECIALIZACIÓN TIPO ARTÍCULO DEPARTAMENTO DE MECATRÓNICA Y ELECTROMECAÁNICA	Código	FDE 283
		Versión	01
		Fecha	14-10-2025

Desde el punto de vista operativo, los resultados obtenidos son de gran valor para la gestión del mantenimiento en EPM, ya que permiten enfocar los recursos y actividades sobre los equipos que realmente limitan la confiabilidad de la planta. El uso integrado de indicadores (MTBF, MTTR, λ , μ , A) junto con el análisis Weibull proporciona una visión cuantitativa y predictiva del desempeño, lo cual constituye un avance respecto a los enfoques tradicionales basados únicamente en la experiencia. Además, el modelo RAM desarrollado puede ser replicado en otras plantas, adaptando los parámetros estadísticos a las condiciones específicas de cada central.

Finalmente, es importante reconocer ciertas limitaciones del estudio. En primer lugar, los registros históricos de fallas presentan dispersión en la calidad de la información y eventuales diferencias en los criterios de clasificación de eventos. En segundo lugar, el número de fallas disponibles para algunos modos no permitió obtener ajustes estadísticos robustos ($n < 3$), lo que restringe la interpretación de ciertos parámetros β y η . Sin embargo, los resultados son representativos y consistentes con el comportamiento observado en campo. A futuro, se recomienda implementar un sistema de captura y clasificación automatizada de eventos integrado con Máximo o plataformas de monitoreo que facilite la actualización continua del modelo RAM y su aplicación para la planificación óptima del mantenimiento.


En conjunto, la discusión de los resultados demuestra que la integración de análisis Weibull, RBD y simulación RAM permite comprender de manera profunda los mecanismos de falla, cuantificar su impacto sobre la disponibilidad y orientar decisiones de mantenimiento que incrementen la confiabilidad operativa de la central hidroeléctrica Niquía.

5. CONCLUSIONES

El desarrollo de este estudio permitió aplicar metodologías de análisis de confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad (RAM) en la central hidroeléctrica Niquía, integrando herramientas estadísticas y de modelación para sustentar decisiones de mantenimiento basadas en evidencia.

El análisis de registros históricos de fallas evidenció que los sistemas de excitación, generador y control de temperatura concentran más del 80 % de las indisponibilidades registradas entre 2020 y 2024. La matriz de criticidad permitió jerarquizar los equipos con mayor impacto operacional, destacando el puente grúa, el transformador de potencia de 22 MVA, el banco de cilindros de CO₂ y el interruptor de campo U1 como elementos que deben ser objeto prioritario de inspecciones, pruebas funcionales y gestión de repuestos. Esta identificación sistemática constituye la base para definir políticas de mantenimiento más efectivas y reducir el riesgo asociado a fallas imprevistas.

Se analizaron estadísticamente los modos de falla y se determinó su comportamiento de confiabilidad, el ajuste de distribuciones Weibull de dos parámetros permitió caracterizar cuantitativamente el régimen de falla de los componentes más relevantes. En la mayoría de los casos, los valores de $\beta < 1$ reflejaron la presencia de fallas de tipo infantil o aleatorio, asociadas a deficiencias en la calibración, el montaje o la puesta en servicio, mientras que pocos modos presentaron $\beta > 1$, indicando un comportamiento de desgaste progresivo típico del envejecimiento físico. Los parámetros de escala η obtenidos (entre 2.000 y 11.000 horas) permitieron estimar la vida media operativa de los equipos, mientras que los altos valores de $R^2 (>0,9)$ confirmaron la validez estadística del modelo. Esta caracterización proporciona una línea base confiable para proyectar la frecuencia de fallas y establecer ciclos óptimos de intervención.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO ESPECIALIZACIÓN TIPO ARTÍCULO DEPARTAMENTO DE MECATRÓNICA Y ELECTROMECAÁNICA	Código	FDE 283
		Versión	01
		Fecha	14-10-2025

Se desarrolló el diagrama de bloques de confiabilidad (RBD) que representa la interacción funcional entre los subsistemas hidráulico, eléctrico y de control. La integración de los indicadores de falla (λ) y reparación (μ) en el modelo permitió simular escenarios de disponibilidad bajo diferentes condiciones de mantenimiento. Los resultados mostraron que una reducción del 15–20 % en los tiempos de reparación (MTTR) en los sistemas de generador y excitación puede incrementar la disponibilidad global en aproximadamente 1,8 puntos porcentuales, lo cual demuestra el impacto directo de las estrategias de mantenibilidad sobre el desempeño operativo.

El análisis de las curvas de confiabilidad $R(t)$ permitió visualizar la evolución temporal de la probabilidad de supervivencia de los componentes críticos de la central, aportando una comprensión más profunda de su comportamiento operativo. Las curvas mostraron una disminución pronunciada de la confiabilidad en las primeras 2.000 a 3.000 horas de operación, especialmente en los modos asociados al sistema de control (DIGIPID), la bobina de cierre y los puentes de tiristores, lo que confirma la presencia de fallas tempranas relacionadas con calibración, conexión o sensibilidad de los dispositivos electrónicos. Por el contrario, los sistemas hidráulicos y de refrigeración exhibieron una pendiente más suave, con una confiabilidad que se mantiene elevada durante la mayor parte del ciclo de vida, evidenciando un comportamiento de desgaste progresivo más predecible.

Estas tendencias reafirman la necesidad de fortalecer los procedimientos de verificación inicial, calibración y mantenimiento preventivo durante las primeras etapas de operación, así como de implementar estrategias de mantenimiento predictivo y monitoreo continuo para los sistemas electrónicos. En conjunto, las curvas $R(t)$ demuestran que la confiabilidad global de la unidad depende no solo del envejecimiento físico de los equipos, sino también de la robustez del control automático y la calidad de la puesta en marcha, aspectos que, al ser optimizados, pueden generar incrementos sostenibles en la disponibilidad total de la central.


En conjunto, la investigación valida que la aplicación combinada de la metodología RAM, el análisis Weibull y la simulación mediante RBD constituye una herramienta robusta para la gestión de activos en centrales hidroeléctricas. Este enfoque permite cuantificar el comportamiento de falla, priorizar intervenciones, optimizar recursos y aumentar la disponibilidad técnica de las unidades de generación. Asimismo, los resultados obtenidos sientan las bases para replicar la metodología en otras plantas del portafolio de EPM, fortaleciendo el enfoque corporativo hacia un mantenimiento basado en confiabilidad y riesgo (RCM/RBM).

AGRADECIMIENTOS Y FINANCIACIÓN (Opcional)

Expreso mi más sincero agradecimiento a todas las personas que contribuyeron al desarrollo de este trabajo. En primer lugar, a mi esposa Ana María, por su comprensión, apoyo incondicional y motivación constante durante todo el proceso académico y profesional, pilares fundamentales para culminar con éxito esta etapa.

De igual manera, agradezco al ingeniero Ricardo Ramírez por su valiosa asesoría técnica y transferencia de conocimiento en temas de confiabilidad, mantenibilidad y análisis estadístico, cuya orientación fue decisiva para fortalecer la rigurosidad metodológica de este estudio de caso.

Asimismo, extiendo un especial reconocimiento a los magísteres María Vilma García y María Isabel Ardila, por su acompañamiento, orientación y asesoría académica, así como por sus oportunas observaciones que enriquecieron el desarrollo del trabajo y permitieron consolidar los resultados presentados.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO ESPECIALIZACIÓN TIPO ARTÍCULO DEPARTAMENTO DE MECATRÓNICA Y ELECTROMECAÁNICA	Código	FDE 283
		Versión	01
		Fecha	14-10-2025

Finalmente, al Instituto Tecnológico Metropolitano ITM, por brindar el espacio académico y los recursos necesarios para la aplicación práctica de los conocimientos adquiridos, y a todos los compañeros y docentes del programa por sus valiosos aportes y colaboración durante la formación en la Especialización en Gestión del Mantenimiento Industrial.

CONTRIBUCIÓN DE AUTORÍA

El autor principal fue responsable de la conceptualización del estudio, el tratamiento y análisis formal de los datos, la interpretación de resultados y la redacción del manuscrito original.

Los magísteres María Vilma García Buitrago y María Isabel Ardila Marín participaron activamente en el diseño metodológico, brindaron supervisión técnica y orientación académica durante el desarrollo del trabajo, y realizaron la revisión crítica y edición final del manuscrito, aportando observaciones y correcciones sustanciales que enriquecieron la calidad del documento.

CONFLICTOS DE INTERÉS

El autor declara no tener ningún conflicto de intereses de tipo personal, académico, financiero o institucional que haya influido en la realización, desarrollo, análisis o resultados del presente trabajo.

Asimismo, manifiesta que no existen relaciones contractuales, comerciales o de dependencia con entidades que pudieran percibirse como un posible sesgo en la interpretación de los hallazgos o en las conclusiones del estudio.


El contenido de este artículo refleja exclusivamente el criterio técnico, académico y científico del autor y sus asesoras, sin influencias externas en su elaboración o publicación.

DECLARACIÓN DE IA (Opcional)

El autor declara que durante el desarrollo del presente trabajo se emplearon herramientas de inteligencia artificial generativa (IA), específicamente ChatGPT (modelo GPT-5, OpenAI), con fines de apoyo en la redacción técnica, estructuración del manuscrito, verificación de coherencia metodológica y mejora de estilo académico.

DISPONIBILIDAD DE DATOS

https://itmeduco-my.sharepoint.com/:f:/g/personal/mariagarcia_itm_edu_co/EvAUuPxCe2VGgrS1WGeEtGsBIVm_Ic8CGjB-kF3txHFf5Q

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO ESPECIALIZACIÓN TIPO ARTÍCULO DEPARTAMENTO DE MECATRÓNICA Y ELECTROMECAÁNICA	Código	FDE 283
		Versión	01
		Fecha	14-10-2025

6. REFERENCIAS

Bulut, M., & Özcan, E. (2021). A new approach to determine maintenance periods of the most critical hydroelectric power plant equipment. *Reliability Engineering & System Safety*, 205, 107238. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2020.107238>

Martinez Monseco, F. J. (2020). Analysis of maintenance optimization in a hydroelectric power plant. *Journal of Applied Research in Technology & Engineering*, 1(1), 23. <https://doi.org/10.4995/jarte.2020.13738>

Osman, K., Alajbeg, T., & Perić, M. (2022). Reliability, maintainability, and availability methodology based on statistical approach for cooling systems design modification and maintenance. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 44(2), 4364-4380. <https://doi.org/10.1080/15567036.2022.2075992>

Predictiva 21. (s. f.). *Cambios en la norma ISO 14224:2016—Recolección e intercambio de data de confiabilidad y mantenimiento para equipos—Categorías de mantenimiento*. Recuperado 24 de mayo de 2025, de <https://predictiva21.com/cambios-en-la-norma-iso-142242016>

Ríos Velásquez, Á., Mancipe Barrero, B. S., García Navarro, J. G., & Jaramillo Romero, M. A. (2024). Pronóstico y análisis de la confiabilidad de una central hidroeléctrica en Colombia implementando una tasa de fallas móvil en el tiempo. *Ingeniería y Desarrollo*, 42(02), 224-243. <https://doi.org/10.14482/inde.42.02.612.049>


Selvaraju, S., & Hamid, M. F. A. (2018). *Reliability, Availability and Maintainability Study of A Power Generation Plant*.

Singh, P., Singh, S., Soltanali, H., & Vardhan, S. (2025). A reliability, availability and maintainability (RAM) model for electromechanical components in hydropower plants. *International Journal of System Assurance Engineering and Management*. <https://doi.org/10.1007/s13198-024-02692-2>

SoporteyCia—RCM2 | Estrategias para el ciclo de vida. (s. f.). Recuperado 24 de mayo de 2025, de <https://rcm2-soporte.com/>

UNE-EN 60300-3-11:2013 *Gestión de la confiabilidad. Parte 3-11...* (s. f.). Recuperado 24 de mayo de 2025, de <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma/?c=N0051579>

Soltanali, H., & al. (2024). A reliability, availability and Maintainability (RAM) model for electromechanical components in hydropower plants. *International Journal of System Assurance Engineering and Management*. <https://doi.org/10.1007/s13198-024-02692-2>

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO ESPECIALIZACIÓN TIPO ARTÍCULO DEPARTAMENTO DE MECATRÓNICA Y ELECTROMECAÁNICA	Código	FDE 283
		Versión	01
		Fecha	14-10-2025

7. PERMISOS Y AUTORIZACIONES

El estudiante abajo firmante, en calidad de autor principal, autoriza a los docentes participantes del artículo presentado en versión borrador, completarlo, adaptarlo y postularlo a revistas científicas, congresos o eventos académicos. Esta autorización no implica cesión de los derechos morales, por lo que el estudiante deberá ser reconocido como autor principal en cualquier publicación, presentación o difusión derivada de este trabajo.

Como prueba de lo anterior los estudiantes firman el siguiente documento:

Nombre Estudiante: Johnatan Andres Cardona Velasquez

Firma: Johnatan A. Cardona V.

Cédula: 1128391884

Fecha: 03/11/2025

Correo Electrónico: johnatancardona229773@correo.itm.edu.co