

ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN / RESEARCH ARTICLE

<https://doi.org/10.14482/inde.42.02.612.049>

Pronóstico y análisis de la confiabilidad de una central hidroeléctrica en Colombia implementando una tasa de fallas móvil en el tiempo

Forecasting and analysis of the reliability of a hydroelectric power plant in Colombia through the application of a time-varying failure rate

ÁNGEL RÍOS VELÁSQUEZ *

BRAYAN STEVEN MANCIPE BARRERO **

JUAN GUILLERMO GARCÍA NAVARRO ***

MARIO ALONSO JARAMILLO ROMERO ****

* Universidad Autónoma de Manizales (UAM). Investigador *freelancer*. Manizales, Caldas (Colombia). Departamento de Mecánica y Producción. Ingeniero Mecánico. Orcid ID: <https://orcid.org/0009-0007-7917-209X>. angel.riosv@autonoma.edu.co.

** Universidad Autónoma de Manizales (UAM). Investigador *freelancer*. Manizales, Caldas (Colombia). Departamento de Mecánica y Producción. Ingeniero mecánico. Orcid ID: <https://orcid.org/0009-0007-8590-1957>. brayan.mancipeb@autonoma.edu.co.

*** Universidad Autónoma de Manizales (UAM). Manizales, Caldas (Colombia). Docente investigador. Departamento de Mecánica y Producción. Doctor en Ingeniería. Orcid ID: <https://orcid.org/0000-0002-8540-3196>. juang.garcian@autonoma.edu.co.

**** Central Hidroeléctrica de Caldas (CHEC). Manizales, Caldas (Colombia). Coordinador del Equipo de Mantenimiento. Área de Generación. Especialista en Gestión de Activos y Proyectos. Orcid ID: <https://orcid.org/0009-0000-3076-0885>. mario.jaramillo@chec.com.co.

Correspondencia: Ángel Ríos Velásquez, calle 32A n° 3-56. Manizales, Caldas (Colombia). Teléfono (+57) 310 411 4861

Subvenciones: Este artículo es resultado de la investigación “Optimización de estrategias de mantenimiento en la infraestructura crítica de generación de la Central Hidroeléctrica de Caldas CHEC grupo EPM basados en tecnologías 4.0”, inicio: 01/11/2021, final: 31/12/2023, código 89025, financiado por el Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación.



Resumen

La generación energética en Colombia está fuertemente ligada a las centrales hidroeléctricas, lo que hace crucial la optimización de tareas de mantenimiento para garantizar su máxima disponibilidad. Por tal motivo, este trabajo se centra en analizar la confiabilidad de una central hidroeléctrica con el fin de respaldar la toma de decisiones en la planeación del mantenimiento. Esta investigación se basó en el histórico de datos de la planta, en el que se registran los reportes que causan su indisponibilidad. A partir de esta información se determinó el MTBF (tiempo medio entre fallas) de los equipos y su confiabilidad, así como la de las dos unidades generadoras que componen la central. Finalmente, se implementó un método basado en el indicador técnico EMA (media móvil exponencial), que permitió pronosticar la tendencia de la confiabilidad en el tiempo. Los resultados obtenidos brindaron una evaluación del estado actual de la central hidroeléctrica y permitieron identificar los equipos críticos en términos de fallas, a los que se deben orientar recursos para fortalecer la disponibilidad de la planta.

Palabras clave: central hidroeléctrica, confiabilidad, distribución exponencial, media móvil, MTBF.

Abstract

Power generation in Colombia is strongly linked to hydroelectric power plants, which makes it crucial to optimize maintenance tasks to ensure maximum availability. For this reason, this work focuses on analyzing the reliability of a hydroelectric power plant in order to support decision-making in maintenance planning. The research is based on the historical data of the power plant, in which the reports that cause its unavailability are recorded. From this information, the mean time between failures (MTBF) of the equipment and its reliability was determined, as well as that of the two generating units that make up the power plant. Finally, a method based on the technical indicator EMA (exponential moving average) was applied to predict the reliability trend over time. The results obtained provided an assessment of the status of the hydroelectric power plant and made it possible to identify the critical equipment in terms of failures, to which resources should be allocated to strengthen the plant's availability.

Keywords: hydroelectric power plant, reliability, exponential distribution, moving average, MTBF.

INTRODUCCIÓN

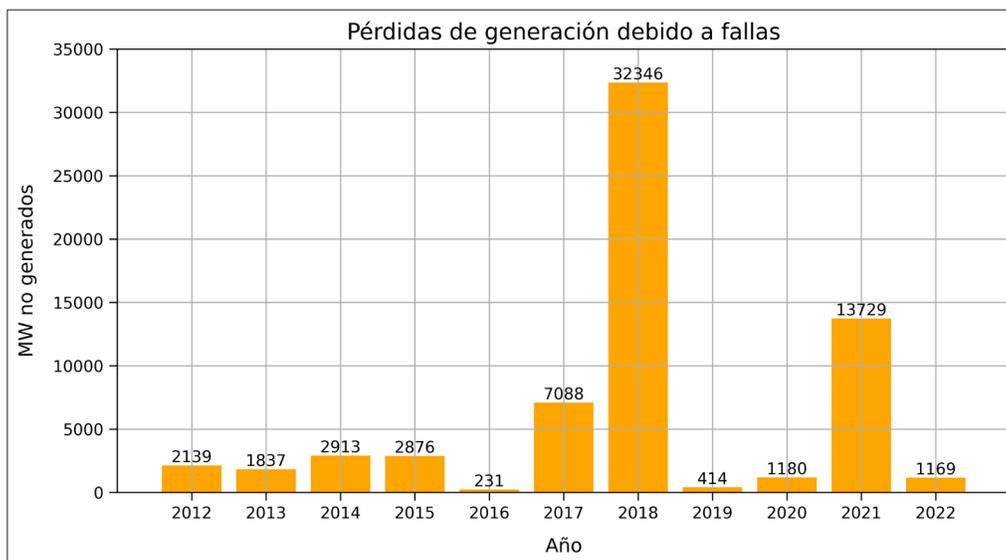
En 2022, las fuentes de energía renovable en Colombia representaron el 85,41 % de la demanda eléctrica total del país, siendo la fuente hidráulica la principal contribuyente, con un 83,66 % [1]. Este hecho resalta la criticidad de estos sistemas dentro de la matriz energética del país, y por tanto, la necesidad de mantenerlas el mayor tiempo operando. Es por esta razón que los estudios de confiabilidad adquieren relevancia, ya que permiten asegurar un funcionamiento óptimo y continuo de las plantas a través de estrategias de mantenimiento y planes de mejora. Los estudios de confiabilidad, además, sirven para direccionar correctamente las inversiones, incrementar la rentabilidad, la seguridad, la satisfacción de los clientes y usuarios [2].

En una central hidroeléctrica, diferentes sistemas gobiernan el proceso de generación de energía, incluyendo la conducción, la admisión, la turbina, el regulador de velocidad, el generador, el regulador de tensión, el control, la refrigeración, el drenaje, los servicios auxiliares y la casa de máquinas. Cada uno de estos sistemas desempeña un papel crucial en el funcionamiento confiable de la central.

Los análisis de confiabilidad no solo se aplican en el campo de la generación eléctrica, sino también en otras industrias, como la minera [3], agrícola [4], industrial [5] y petrolera [6], con el objetivo de optimizar los costos de mantenimiento, reducir los riesgos de fallas y mejorar el diseño y la operación de los sistemas y equipos involucrados. En el caso específico de la generación eléctrica, se han realizado estudios como el mencionado en [7], que examina la confiabilidad de una central eléctrica a gas para prevenir fallas recurrentes y cortes prolongados en el suministro eléctrico.

La confiabilidad de los equipos se define como la probabilidad de cumplir su función sin interrupciones durante un intervalo de tiempo y condiciones de operación determinadas [8]. Los análisis de confiabilidad proporcionan una base sólida para implementar la ingeniería de confiabilidad, simplificando la identificación de las causas de pérdida de productividad. Estos análisis permiten enfocar los recursos de manera efectiva para prevenir fallas, tanto en los equipos como en los sistemas, incluyendo posibles errores humanos en intervenciones o mantenimientos. Como resultado se logra aumentar la disponibilidad y productividad de las plantas.

La central hidroeléctrica en estudio es una instalación de 30 MW, que durante el período analizado, 2012 a 2022, experimentó una pérdida promedio de generación de 5993 MW por año, lo que equivale aproximadamente a 8,3 días de indisponibilidad. Este hecho resalta la necesidad de implementar enfoques integrales que brinden una visión completa de la central y permitan tomar medidas para mejorar tanto la calidad del servicio eléctrico como la viabilidad económica de la empresa. La Figura 1 muestra en detalle la cantidad de MW que no se generaron durante este período.



Fuente: autores.

FIGURA 1. PÉRDIDAS DE GENERACIÓN DEBIDO A FALLAS DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA

En este proyecto se llevó a cabo un exhaustivo análisis de grandes volúmenes de datos, evaluando 6120 informes de mantenimiento y operación correspondientes a un período de 11 años (2012-2022). La estructura de la información suministrada por la empresa facilitó el filtrado y la reorganización eficiente de los datos relevantes, lo cual mejoró la gestión y la identificación de patrones y tendencias. El riguroso almacenamiento de información es crucial para cualquier estudio basado en analítica de datos, debido a que garantiza la integridad y confiabilidad de los datos analizados. Estos resultados respaldan una toma de decisiones fundamentada y acertada [9].

Con el histórico de datos de la planta se pretende determinar la confiabilidad (en periodos de tiempo mensual) de las unidades teniendo en cuenta los equipos que las componen, entendiendo la “unidad” de una central como la combinación de turbina, generador y equipos misceláneos que trabajan de manera conjunta para convertir la energía hidráulica en energía eléctrica. Para evaluar la confiabilidad se empleó la distribución exponencial con una tasa de fallas constante (etapa de vida útil) [10], en la cual se utilizó una estrategia basada en la media móvil simple (SMA, por sus siglas en inglés) para modelar la tasa de fallas; un indicador técnico empleado en el análisis de datos que permitió considerar los reportes de falla ocurridos en un periodo de tiempo específico.

Por otro lado, para analizar el comportamiento y pronosticar la tendencia de la confiabilidad normalmente se emplean métodos basados en la descomposición de series

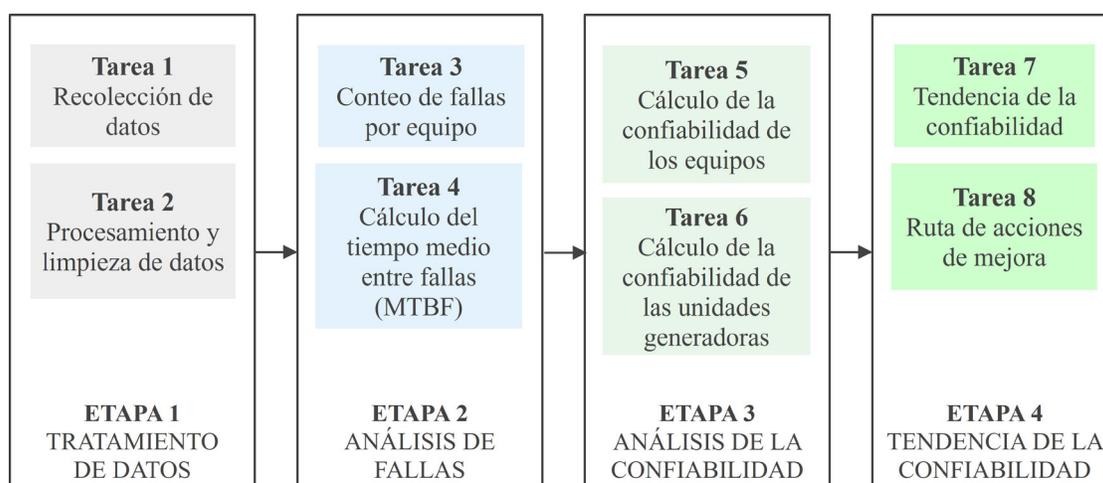
temporales, tal y como se propone en [11], [12] y [13]. Uno de estos métodos se conoce como ARIMA (en inglés, AutoRegressive Integrated Moving Average), utilizado para comprender y predecir el comportamiento de series temporales. Sin embargo, puede requerir un ajuste complejo para capturar cambios en el comportamiento de la confiabilidad, ya que generalmente se basa en el análisis de la estructura de autocorrelación de los datos [14]. Otro enfoque es el de la media móvil exponencial (EMA, por sus siglas en inglés), indicador técnico comúnmente empleado en economía para el análisis y proyección de los mercados financieros [15]. La implementación de la EMA es más sencilla en comparación con el modelo ARIMA, y presenta la ventaja adicional de ser menos dependiente de la estructura de autocorrelación de los datos. Sin embargo, lo que destaca a la EMA es su capacidad para identificar cambios de manera más rápida gracias a su enfoque en otorgar mayor peso a los datos más recientes. Esta característica le permite detectar patrones y tendencias con mayor eficiencia que otros métodos de suavizado, como la media móvil simple. En el contexto de la confiabilidad, es especialmente relevante otorgar mayor peso a los datos más recientes, ya que estos suelen ser más representativos de las condiciones y el rendimiento actual de los equipos. Esto se debe a que los datos más recientes incorporan las últimas mejoras o correcciones realizadas en los equipos, lo que contribuye a una evaluación más precisa de su confiabilidad. Al dar mayor importancia a estos datos, se puede obtener una visión actualizada y más fiable del desempeño de los equipos y realizar pronósticos más precisos.

El principal aporte de este trabajo es brindar un diagnóstico de confiabilidad de la planta, permitiendo identificar áreas de mejora en términos de disponibilidad de equipos, costos de mantenimiento y calidad del servicio eléctrico. Este enfoque proporciona indicadores de calidad que impulsan estrategias de mantenimiento, que aumentan la disponibilidad de la planta y reduce las tarifas para los usuarios. Además, se pretende proporcionar, con el método basado en la EMA, un pronóstico de la tendencia de la confiabilidad como una herramienta de monitoreo y toma de decisiones para optimizar el rendimiento de la planta.

En este artículo inicialmente se presenta una metodología en la que se realiza una descripción de la central hidroeléctrica, dando a conocer características específicas. Así mismo se explica detalladamente cada una de las etapas abordadas para determinar la confiabilidad. Por otro lado, en el apartado de resultados y discusión, donde se analiza la tendencia de la confiabilidad de las unidades generadoras a lo largo del tiempo y se identifican equipos críticos en la operación de la planta. Finalmente, se presentan las conclusiones de los resultados fundamentadas en las hipótesis de la investigación.

METODOLOGÍA

La central hidroeléctrica bajo estudio está compuesta por dos unidades generadoras de 15 MW cada una, que operan las 24 horas del día durante todo el año. Estas unidades utilizan turbinas Francis verticales que aprovechan una caída de agua de 171 metros para generar energía eléctrica. El objetivo de este estudio fue desarrollar una estrategia para analizar la confiabilidad de la central a través del análisis de fallas en sus equipos. Para lograrlo, se propuso una metodología basada en el procesamiento de un gran volumen de datos, que permitió determinar la confiabilidad de la planta y predecir su comportamiento futuro. Este proceso se dividió en ocho tareas (ver Figura 2), agrupadas en cuatro etapas claves: tratamiento de datos, análisis de fallas, análisis de confiabilidad y análisis de tendencias.



Fuente: autores.

FIGURA 2. DIAGRAMA DE FLUJO DE LA METODOLOGÍA

Todo el procedimiento se trabajó con el lenguaje de programación Python, usando principalmente las librerías “pandas” y “numpy” para el manejo eficiente de los volúmenes de datos. A continuación, se describen detalladamente las etapas del proceso:

Etapa 1. Tratamiento de datos

En esta etapa inicial del estudio se procedió a recopilar las bases de datos de la central hidroeléctrica (Tarea 1). La información relevante se encuentra en un archivo denominado “consolidado de eventos”, que abarca el período enero de 2012 a diciembre de 2022 y se registra mensualmente. En este archivo se tiene el registro de las paradas que han causado la indisponibilidad de la central o que la han dejado fuera de servi-

cio. Estas paradas pueden ser causadas por diversos factores, tales como crecientes del río, eventos externos, fallas en equipos, mejoras y tareas de mantenimientos.

A partir de la información que tiene el consolidado de eventos, se procedió con el filtrado de la información (Tarea 2), en el que se seleccionaron únicamente las variables relevantes para clasificar los datos. Estas variables se muestran en la Tabla 1 e incluyen la fecha inicial y final en la que se detecta y corrige el tipo de parada, el tiempo de indisponibilidad de la unidad generadora o de toda la planta siendo el caso, la descripción del equipo y el tipo de parada. Dado que el estudio de confiabilidad se enfoca en la frecuencia o periodicidad con la que ocurren las fallas, se trabajó únicamente con los reportes que se relacionan directamente con este tipo de parada. Así, se obtuvo una muestra más específica de datos que permitió un análisis más preciso de la confiabilidad de la central hidroeléctrica.

TABLA 1. VARIABLES USADAS PARA CLASIFICAR LOS DATOS

Variable	Descripción
Datos iniciales	Fecha exacta en la que la planta queda fuera de servicio
Datos finales	Fecha exacta en la que se corrige el tipo de parada y la planta entra de nuevo en operación
Horas indisponibles	Tiempo total de indisponibilidad de la planta a causa de la parada
Descripción equipo	Equipo al que se le atribuye la parada de la planta
Tipo	Clasificación de la parada

Fuente: autores.

Etapa 2. Análisis de fallas

A partir del histórico de datos se procedió a generar un registro único de los equipos de la planta que presentaron fallas a lo largo de la ventana de tiempo, en el que solo se procesaron los equipos que reportaron fallas (Tarea 3). Es importante destacar que la indisponibilidad de la central hidroeléctrica debido a fallas es altamente variable, ya que depende de diversos factores, como la disponibilidad del personal, los repuestos, las herramientas y la gravedad o severidad de la falla en sí. Cada reporte de falla implica la salida de operación de las unidades de la planta, lo que origina la interrupción de la generación de electricidad.

Posteriormente, se calculó el tiempo medio entre fallas (MTBF) (Tarea 4) para cada uno de los equipos en cada periodo, lo cual es necesario para determinar la confiabi-

lidad utilizando la ecuación de la distribución exponencial. El MTBF se puede calcular a partir de la ecuación 1:

$$MTBF = \frac{t_{OP}}{r_F} \quad (1)$$

donde t_{OP} es el tiempo de operación del equipo considerado y r_F es la cantidad de reportes por falla en el periodo analizado. Los tiempos de operación de los equipos se definen según el periodo de análisis.

Con el fin de evitar que las fallas ocurridas en períodos muy distantes afecten el valor de la confiabilidad actual, se aplicó un enfoque que considera únicamente las fallas ocurridas en los últimos 3 años o lo que sería equivalente a 26 280 horas. Este enfoque se basa en la media móvil simple (SMA), la cual determina un promedio aritmético de un conjunto de datos en un período de tiempo específico y se actualiza continuamente según la disponibilidad de los datos. La elección de este periodo se debe a que se encontró relevante no incluir fallas lejanas al periodo de análisis, ya que no representan el estado actual de los equipos o unidades debido a correcciones en los mantenimientos y reposición de repuestos o equipos realizadas. Cabe resaltar que en la planta se realiza un “overhaul” (mantenimiento completo y significativo de un equipo o sistema) cada 7 años, pero en este caso emplear intervalos de tiempo más largos a 3 años generaría un nivel elevado de ruido en los resultados de confiabilidad debido a las mejoras y correcciones constantes en los equipos.

Etapa 3. Análisis de la confiabilidad

Para el cálculo de la confiabilidad de los equipos de la central hidroeléctrica (Tarea 5), se consideraron dos distribuciones de probabilidad ampliamente empleadas en el modelamiento de confiabilidad: la distribución Weibull y la distribución exponencial [16]. 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 [17]. Esto brinda una ventaja sobre la distribución exponencial, que solo representa la fase normal de operación con fallas aleatorias. Sin embargo, 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 (ecuación 2) depende del MTBF como única variable, lo que facilita su aplicación. Además, es utilizada para modelar eventos que ocurren de manera aleatoria y sin

memoria. Por último, se optó por utilizar la distribución exponencial, debido a que permite trabajar con un tamaño de muestra reducido sin comprometer la profundidad del análisis, en el que la única dependencia es el MTBF. La confiabilidad modelada a partir de dicha distribución se define como:

$$R(t) = e^{\left(\frac{-1}{MTBF}\right)t} \quad (2)$$

donde $R(t)$ es la confiabilidad del equipo, e es la base de los logaritmos neperianos, $MTBF$ es el tiempo medio entre fallas y t el tiempo específico de operación.

Este tiempo específico de operación (t) se puede interpretar como el tiempo proyectado para que el equipo opere sin fallar. En este caso se asumió un tiempo equivalente a 1 mes (730 horas) para determinar la confiabilidad de los equipos en cada periodo. Esto debido a la baja frecuencia de ocurrencia de fallas o indisponibilidad de la central.

Una vez obtenida la confiabilidad individual de los equipos a lo largo de los periodos de análisis, se procedió a calcular la confiabilidad para las dos unidades generadoras de la central hidroeléctrica (Tarea 6). En primer lugar, se clasificó según la unidad a la que pertenecen los 48 equipos con reportes de falla del histórico de datos, es decir, se identificaron los equipos que hacen parte de la Unidad 1 o la Unidad 2. Este proceso se realizó con la ayuda del registro de equipos de la planta, en el cual se encuentra su respectivo código de identificación y la unidad a la que pertenecen. Durante el proceso de clasificación se encontraron 18 equipos de la Unidad 1 y 15 de la Unidad 2.

Dado que el fallo de cualquiera de estos equipos implica la indisponibilidad o cese de funcionamiento de toda la unidad, se asumió que la configuración de estos equipos en las unidades es la de un sistema en serie. La ecuación empleada para determinar la confiabilidad de un sistema en serie es la siguiente:

$$R_s = \prod_{i=1}^n R_i, \quad (3)$$

donde R_s es la confiabilidad del sistema, R_i es la confiabilidad del i -ésimo componente y n es el número de componentes.

Por tanto, conociendo la confiabilidad individual de cada uno de los equipos (R_i), a partir de la ecuación 3 se determinó el valor de la confiabilidad para cada una de las dos unidades (R_s) de la planta.

Etapa 4. Tendencia de la confiabilidad

Con la finalidad de analizar la tendencia de la confiabilidad (Tarea 7) de los equipos y las unidades a lo largo de la ventana de análisis (2012-2022), se trabajó con la media móvil exponencial (EMA), que se define como:

$$EMA_n = R_n \frac{2}{T+1} + EMA_{n-1} \left(1 - \frac{2}{T+1}\right) \quad (4)$$

donde R_n es el valor anterior de la confiabilidad donde se calcula la EMA, T es el número de periodos seleccionados para la media y EMA_{n-1} es la media móvil exponencial del periodo anterior.

Para implementar la EMA en el análisis de confiabilidad, se utilizó un método conocido como “doble cruce de medias exponenciales” [18]. Este enfoque implica el uso de una media móvil de corto plazo y otra de largo plazo. En los mercados financieros se suele emplear un rango de 5 y 20 días para el corto y largo plazo, respectivamente, o incluso de 10 y 50 días [15]. En el caso del análisis de confiabilidad, que se desarrolla en una ventana de tiempo mensual, se decidió trabajar con medias móviles de 2 y 6 meses. El principio detrás del doble cruce de medias exponenciales es que cuando la media de corto plazo interseca hacia abajo la de largo plazo, se genera una señal de venta (en el contexto de los mercados financieros). Esto implicaría una señal de posible falla para los equipos o unidades en el caso de estudio. Por otro lado, cuando la de corto plazo interseca hacia arriba la de largo plazo, se genera una señal de compra (en el contexto de los mercados financieros), lo que indicaría que los equipos y unidades van a continuar funcionando correctamente.

La tendencia en la confiabilidad de las unidades es fundamental para desarrollar una ruta de acción (Tarea 8) que mejore la disponibilidad de la planta. Al calcular la confiabilidad de cada unidad, se identifica el equipo con menor confiabilidad que afectó negativamente a la unidad. Luego, al analizar la tendencia de confiabilidad de cada unidad, si es ascendente, no se requiere implementar un plan de mejora de manera urgente. Sin embargo, si la tendencia desciende, es crucial revisar las bitácoras de operación para identificar las causas de las fallas. Además, se verifica la situación en la unidad paralela para asegurarse de que las fallas no se estén replicando en ese equipo.

Cuando se observa una repetición de fallas en el equipo y su homólogo, es probable que se trate de una falla periódica o que se hayan cometido errores durante el mantenimiento preventivo. En ambos casos se debe optimizar el plan de mantenimiento preventivo como parte del plan de acción. Si las fallas no se están replicando en ambos equipos, se revisa inicialmente si el mantenimiento preventivo se realizó de manera consistente en ambos equipos. Si es así, indica una falla aleatoria o inducida

por el contexto de operación, y se enfoca en validar las condiciones y protocolos de operación para descartar cualquier mala praxis. Luego, se verifica la gestión del inventario de componentes propensos a fallas aleatorias o repentinas para reducir el tiempo de indisponibilidad.

Además, se debe evaluar la viabilidad financiera de llevar a cabo rediseños en los componentes identificados como problemáticos durante la operación de la planta. Esto permitirá abordar eficientemente las deficiencias y mejorar la confiabilidad a largo plazo.

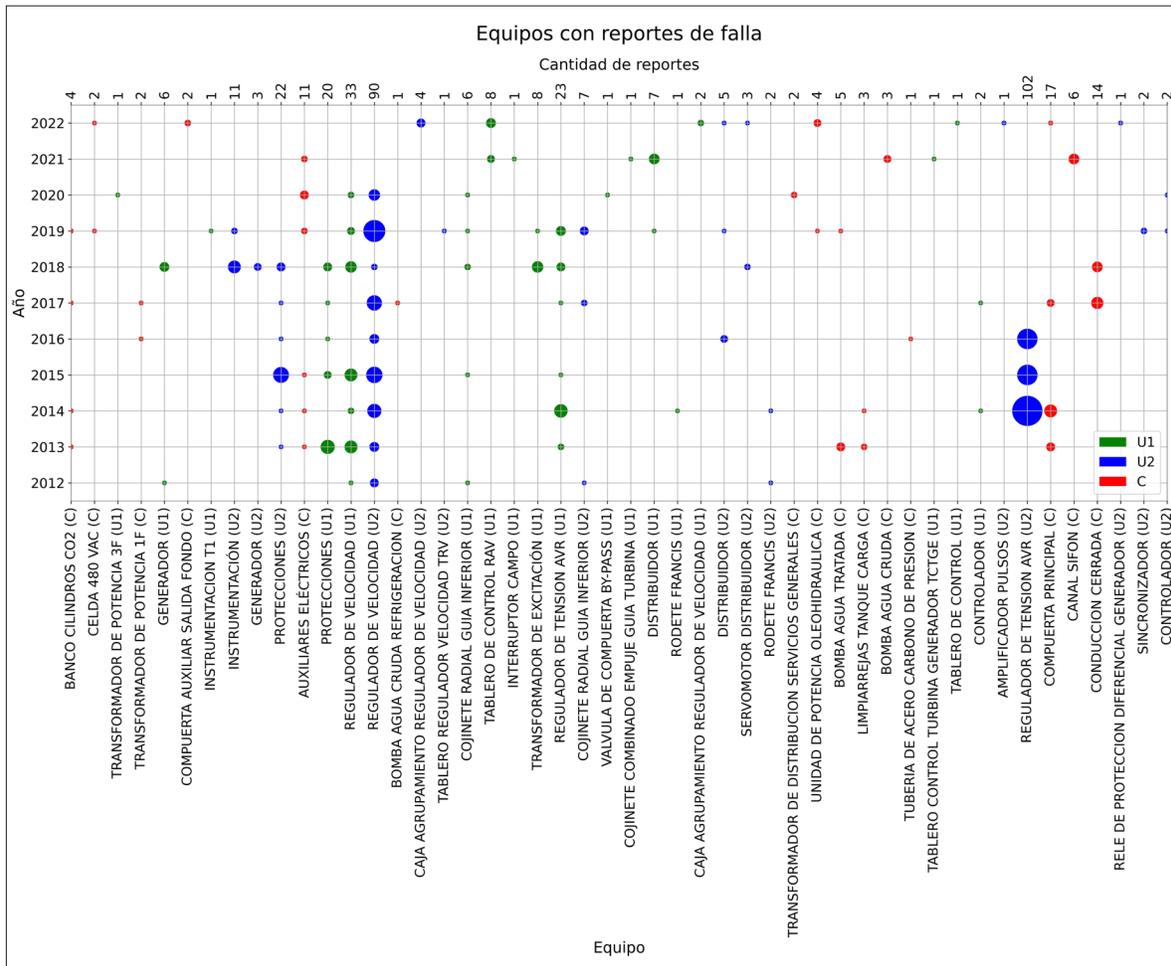
RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este apartado se presenta un análisis detallado de los resultados obtenidos en el contexto del objetivo de la investigación. Se examina la distribución y frecuencia de la ocurrencia de fallas, el tiempo medio entre fallas y la confiabilidad de los equipos. Además, se analiza la tendencia de la confiabilidad de las unidades generadoras, poniendo especial énfasis en aquellos equipos que están afectando su funcionamiento. En todo este análisis se plantean rutas de mejora que puedan contribuir a la confiabilidad de la planta de generación.

Análisis de fallas: Conteo de fallas

En total, de 450 equipos, se identificaron 48 que fallaron. Para cada uno de ellos se contabilizó mensualmente la cantidad de reportes por falla. En la Figura 3 se aprecia la proporción de la cantidad de fallas que presentaron los 48 equipos en cada año. Además, en la descripción de estos, se detalla la unidad a la que pertenecen: los equipos de la Unidad 1 y 2 se etiquetan con “U1” (color verde) y “U2” (color azul), respectivamente, y con “C” (color rojo) los equipos que son compartidos o transversales, es decir, los equipos que satisfacen una función específica en ambas unidades. El tamaño de la burbuja es proporcional al número de reportes por falla.

Con este análisis detallado del conteo de fallas por equipo y período, se obtuvo una visión general de la distribución y frecuencia de las fallas en la central hidroeléctrica. Al realizar esta primera revisión, fue posible identificar los impactos generados por un mayor número de reportes de fallas en años específicos, evidenciando así cómo las acciones correctivas llevadas a cabo en los últimos años han contribuido a una disminución de dichos reportes. Al mismo tiempo, se evidencia que la Unidad 2 ha experimentado un mayor número de fallas en años previos, lo cual indica la necesidad de un enfoque especial en su mantenimiento y mejora continua. Sin embargo, sería precipitado concluir que se puede descartar el impacto de las fallas de la Unidad 1 en la planta, como se podrá corroborar en los siguientes puntos.



Fuente: autores.

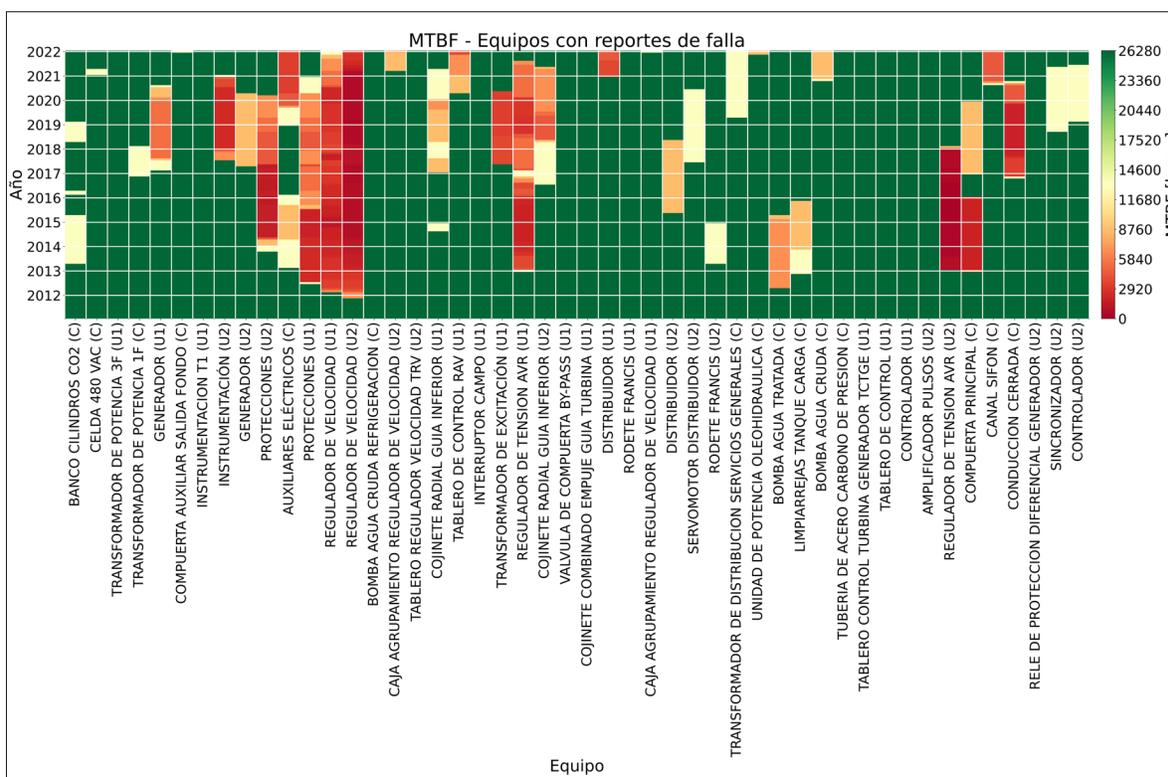
FIGURA 3. FALLAS POR EQUIPO Y PERIODO

Análisis de fallas: MTBF

La elección del período de tiempo para la tasa de fallas móvil tiene un impacto significativo en la confiabilidad y debe ser seleccionado cuidadosamente, considerando el contexto del sistema bajo análisis. Por ejemplo, en la Figura 3 se observa que los datos recopilados durante más de 4 años tienen un efecto considerable en la confiabilidad de la U2, mientras que para la U1 se pueden extender a períodos más largos. Sin embargo, para mantener un análisis equitativo, se mantuvo el mismo período (3 años) para ambas unidades.

En la Figura 4 se muestra el valor del MTBF en horas a lo largo de los periodos de análisis (meses) de los equipos con reportes de falla según la Figura 3. Al observar la

Figura 4, se puede apreciar una diferencia en comparación con la Figura 3, ya que ahora se empieza a notar que la Unidad 1 también cuenta con equipos que presentan fallas recurrentes que afectan la disponibilidad de la planta. Esta nueva información resulta relevante, ya que proporciona una base para realizar un informe preliminar de la planta y comenzar a tomar medidas de mejora futuras, puesto que se están identificando equipos con un alto impacto de las fallas. No obstante, la confiabilidad proporcionará una comprensión más profunda del impacto de estos equipos en la operación y, por consiguiente, brindará información más detallada para respaldar la toma de decisiones.



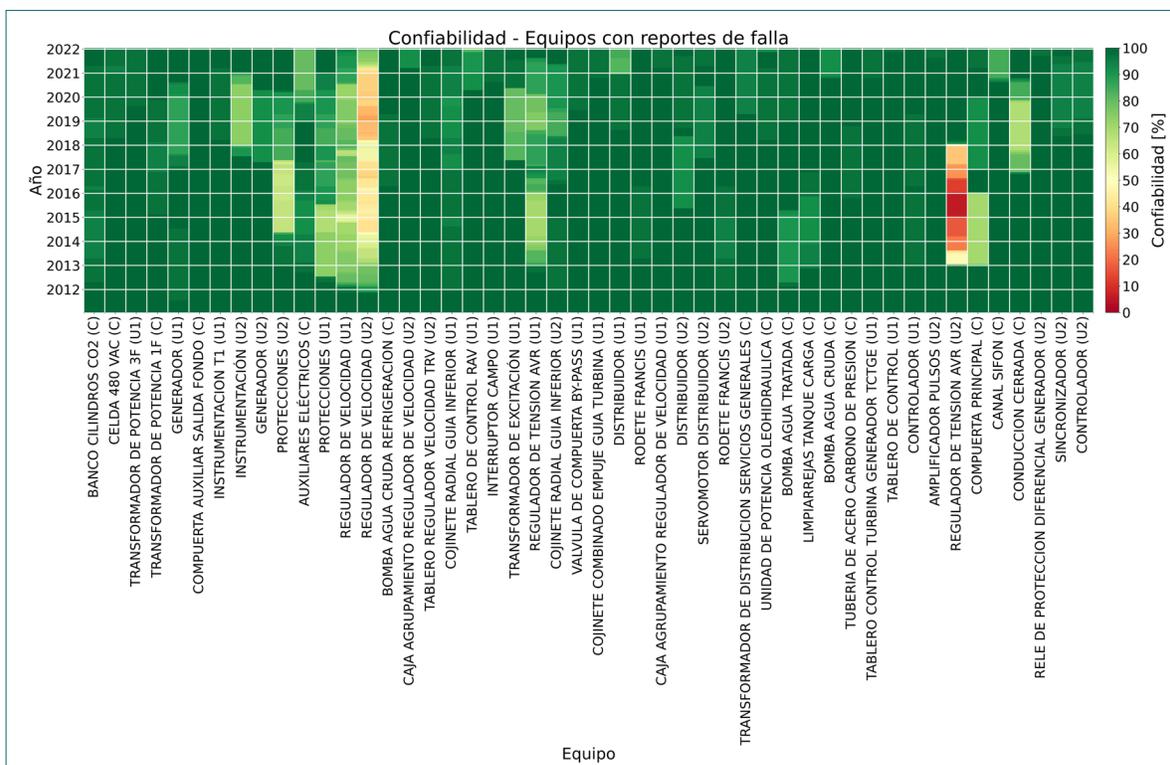
Fuente: autores.

FIGURA 4. MTBF POR EQUIPO Y PERIODO

Evaluación de la confiabilidad de los equipos

Utilizando la ecuación 2, se presenta en la Figura 5 el porcentaje de confiabilidad obtenido en cada mes de la ventana de análisis para los equipos con reportes de falla, tal como se muestra en la Figura 3. Por lo tanto, a partir de este gráfico, se aprecia que dos equipos de la Unidad 2: el “REGULADOR DE VELOCIDAD (U2)”, con confiabili-

dades por debajo del 50 %, y el “REGULADOR DE TENSION AVR U2”, con valores menores al 10 %, han sido los más problemáticos en la operación de la planta a lo largo de los periodos analizados. Así mismo, en la Unidad 1, el “REGULADOR DE VELOCIDAD (U1)”, con valores de confiabilidad por debajo del 70 %. Estos valores aparentemente inofensivos para la Unidad 1 afectarán significativamente la confiabilidad global de dicha unidad, como se analizará a continuación.



Fuente: autores.

FIGURA 5. CONFIABILIDAD POR EQUIPO Y PERIODO

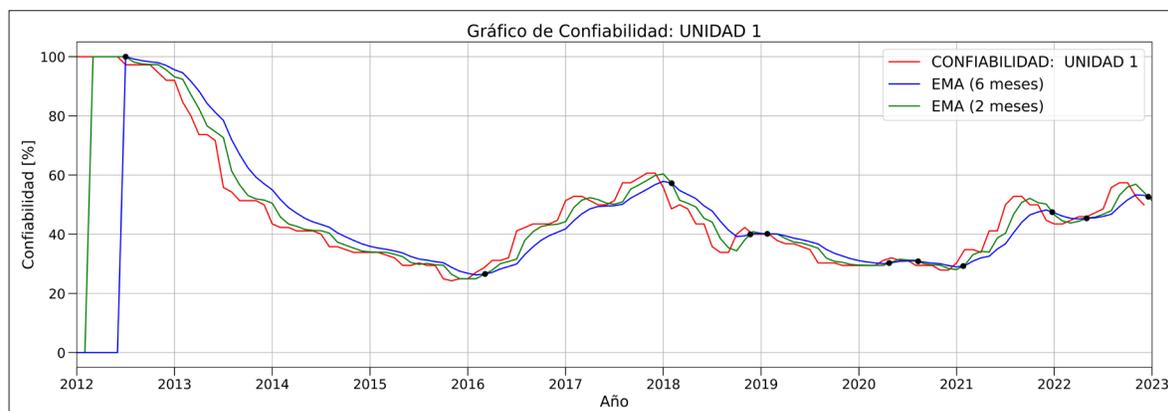
Tendencia de la confiabilidad de las unidades generadoras

Para complementar el análisis de confiabilidad, se realizó una caracterización detallada de las dos unidades de la planta hidroeléctrica. Como parte de este estudio, se calculó la media móvil exponencial (EMA) para cada unidad utilizando periodos de 2 y 6 meses para el cruce de medias. Los resultados correspondientes a la Unidad 1 y la Unidad 2 se presentan en las figuras 6 y 7, respectivamente. Estos gráficos muestran el comportamiento de la confiabilidad a lo largo del periodo analizado para ambas unidades.

Al examinar los datos, se observa que, considerando una proyección de funcionamiento continuo de 1 mes, en la última fecha registrada (diciembre de 2022), la Unidad 2 exhibió una mayor confiabilidad en comparación con la Unidad 1, con valores de 64,11 y 49,93 %, respectivamente. Este aumento en la confiabilidad de la Unidad 2 se debe a la exclusión de las fallas asociadas al “REGULADOR DE TENSIÓN AVR (U2)” que ocurrieron hace más de 3 años y que se superaron gracias al reemplazo de componentes defectuosos durante una intervención de mantenimiento en 2017. Como resultado, se produjo un incremento significativo en la confiabilidad del equipo.

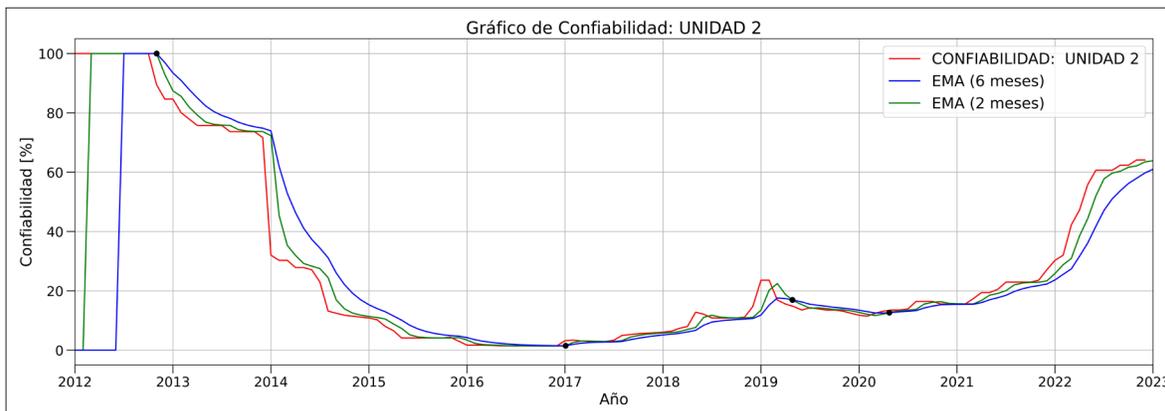
De esta manera, se puede validar que durante el periodo comprendido entre 2018 y 2022 se experimentó un incremento del 58 % en la confiabilidad de la Unidad 2. Estos hallazgos demuestran la efectividad de la aplicación de la media móvil simple (SMA) en la tasa de fallas para el análisis de confiabilidad, ya que brinda una visión más precisa del estado actual de los equipos en cuanto a su confiabilidad, y se evita que el valor se vea afectado por fallas ocurridas en periodos lejanos.

Además, al implementar la media móvil exponencial (EMA) en el análisis de confiabilidad, se pueden observar varios cambios de tendencia destacados con puntos negros en las gráficas. Sin embargo, la presencia de estos cambios de tendencia no implica una mayor desviación de la media de confiabilidad. Aquí se puede notar que el comportamiento de la confiabilidad en la Unidad 1 (ver Figura 6) fue más estable en comparación con la Unidad 2 (ver Figura 7). En la Unidad 2 se aprecia una disminución del 72 % en la confiabilidad desde 2014 hasta 2016, lo cual se justifica por la cantidad de fallas relacionadas principalmente con el “REGULADOR DE VELOCIDAD (U2)” y el “REGULADOR DE TENSIÓN AVR (U2)”.



Fuente: autores.

FIGURA 6. GRÁFICO DE CONFIABILIDAD UNIDAD 1

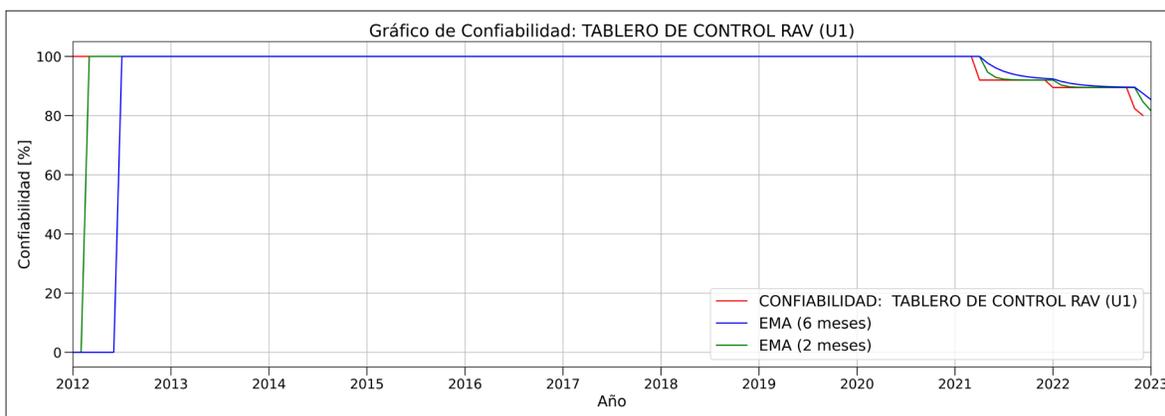


Fuente: autores.

FIGURA 7. GRÁFICO DE CONFIABILIDAD UNIDAD 2

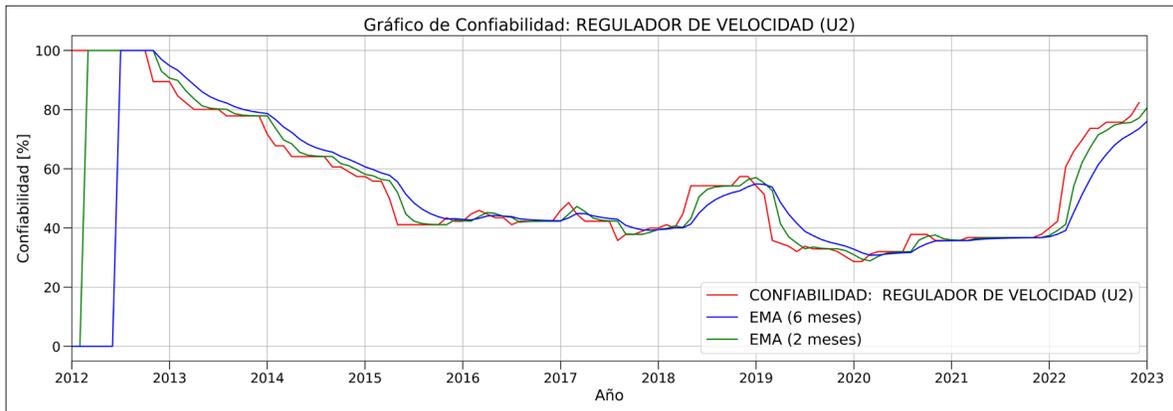
Estado actual de la confiabilidad equipos críticos

Al examinar los datos correspondientes a la última fecha del periodo de estudio (diciembre de 2022), se identificó que los equipos que tienen mayor impacto en la reducción de la confiabilidad son el “TABLERO DE CONTROL RAV (U1)” en la Unidad 1, con un valor de confiabilidad de 80,07 % (ver Figura 8), y el “REGULADOR DE VELOCIDAD (U2)” en la Unidad 2, con un valor de confiabilidad de 82,32 % (ver Figura 9). Aunque estos valores de confiabilidad no se consideran bajos, representan áreas de mejora potencial para la planta. Por lo tanto, se recomienda dirigir recursos y optimizar las actividades de mantenimiento relacionadas con estos equipos, con el objetivo de fortalecer la confiabilidad de la central hidroeléctrica.



Fuente: autores.

FIGURA 8. GRÁFICO DE CONFIABILIDAD EQUIPO CRÍTICO UNIDAD 1



Fuente: autores.

FIGURA 9. GRÁFICO DE CONFIABILIDAD EQUIPO CRÍTICO UNIDAD 2

Considerando las posibles acciones de mejora, se observa que la confiabilidad de la Unidad 1 ha mostrado una tendencia decreciente en los periodos más recientes, lo que señala la necesidad de implementar una ruta de acción para abordar esta situación. Al analizar el equipo que tiene mayor incidencia en la disminución de la confiabilidad de la Unidad 1 “TABLERO DE CONTROL RAV (U1)” (ver Figura 8), se verificó su homólogo en la Unidad 2, el cual no ha presentado fallas. Por lo tanto, se procedió a revisar las bitácoras de operación del equipo, en las que se encontró que las fallas se debían principalmente a disparos de protección por sobretensiones asociadas al “REGULADOR DE TENSION AVR (U1)” de la Unidad 1.

En vista de estos hallazgos, se sugiere una ruta de acción que incluya la verificación de los protocolos y condiciones de operación de los equipos involucrados. Los resultados indican una influencia externa en la materialización de la falla, por lo que es importante identificar la causa raíz para determinar si se requiere optimizar el “stock” de componentes o proponer un rediseño. Es fundamental investigar a fondo la causa real de las fallas, ya que esto influirá en la estrategia de mejora a seguir.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos del análisis de confiabilidad en la central hidroeléctrica han permitido obtener una visión clara del estado actual de la planta e identificar áreas de interés para optimizar el mantenimiento. El análisis de confiabilidad es un indicador relevante para mejorar la disponibilidad de los equipos y la calidad de los servicios prestados. Permite determinar qué equipos están generando una baja probabilidad de funcionamiento óptimo de la planta y, en este caso, se implementó una tasa de fallas móvil para obtener resultados más precisos. Vale mencionar que asegu-

rar la calidad de los datos en este tipo de investigación es de suma importancia para obtener resultados precisos y confiables. Se recomienda seguir buenas prácticas en el tratamiento y almacenamiento de la información, lo cual respaldará la toma de decisiones acertadas.

Además, la implementación de la EMA como parte del análisis de confiabilidad permite detectar cambios significativos en la tendencia de la confiabilidad de los equipos y unidades. La EMA no puede predecir variaciones antes de que ocurra una falla, pero su cruce con la EMA de mayor rango indica la posibilidad de futuras fallas y la necesidad de implementar rutas de acción para mejorar la disponibilidad. En el caso particular de la planta de generación estudiada, se encontró que la confiabilidad de la Unidad 1 mostraba una tendencia descendente en los periodos más recientes, lo que indica la necesidad de implementar una ruta de acción para abordar esta situación. Por otro lado, la confiabilidad de la Unidad 2 mostraba una tendencia ascendente, lo que sugiere que no se requiere una ruta de acción inmediata.

Es importante considerar que, aunque la tasa de fallas móvil en el caso particular de la planta de generación estudiada mostró un comportamiento adecuado con un rango de 3 años, es necesario probar diferentes rangos en la tasa de fallas móvil para determinar el valor más apropiado para otras plantas o tipos de industria. La tasa de fallas móvil a lo largo del tiempo brinda una visión más precisa del estado actual de los equipos en cuanto a su confiabilidad. Al utilizar este enfoque se evita que el valor se vea afectado por fallas ocurridas en periodos lejanos. Esto permite identificar patrones de fallas más relevantes para la operación actual de la planta.

Finalmente, se recomienda implementar la confiabilidad y las medias móviles como indicadores en la producción para realizar un control periódico que permita identificar los activos críticos en la operación y que requieren atención regular. Esto optimizará las labores del área de mantenimiento y facilitará la toma de acciones preventivas de manera oportuna.

REFERENCIAS

- [1] XM, “Generación del SIN. Reporte integral de sostenibilidad, operación y mercado”, 2022. <https://informeanual.xm.com.co/12-generacion-del-sin/index.html>. (Accedido: 25 de Abr., de 2023).
- [2] C. M. Pérez Jaramillo, “Confiabilidad y evolución del mantenimiento”, 2003 [En línea]. Disponible en: www.rcm2-soporte.com
- [3] J. Barabady y U. Kumar, “Reliability analysis of mining equipment: A case study of a crushing plant at Jajarm Bauxite Mine in Iran”, *Reliab Eng Syst Saf*, vol. 93, n.º 4, pp. 647-653, abr. 2008. doi: 10.1016/j.res.2007.10.006.
- [4] P. Najafi, M. Amin Asoodar, A. Marzban y M. A. Hormozi, “Reliability analysis of agricultural machinery: A case study of sugarcane chopper harvester”, *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, vol. 17, n.º 1, pp. 158-165, 2015. [En línea]. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/275651540>. [Accedido: 28 mayo, 2023].
- [5] M. C. Gasca, L. L. Camargo y B. Medina, “Sistema para Evaluar la Confiabilidad de Equipos Críticos en el Sector Industrial”, *Informacion Tecnologica*, vol. 28, n.º 4, pp. 111-124, ago. 2017. doi: 10.4067/S0718-07642017000400014.
- [6] G. Signorini, E. Rigoni y M. Rodrigues, “Reliability Analysis Methodology for Oil and Gas Assets: Case Study of Subsea Control Module Operating in Deep Water Basin at Brazilian Pre-Salt”, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.2523/IPTC-19689-Abstract>. [Accedido: 28 mayo, 2023].
- [7] A. Kolawole, O. O. Agboola, P. P. Ikubanni, O. G. Raji y C. Okechukwu Osueke, “Reliability and power loss analysis: A case study of a power plant in Nigeria”, *Cogent Eng*, pp. 1-13, 2019. doi: 10.1080/23311916.2019.1579426.
- [8] A. Birolini, *Reliability Engineering: Theory and Practice*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2017. doi: 10.1007/978-3-662-54209-5.
- [9] E. Sánchez Godínez y L. Zúñiga Segura, “La importancia de contar con información precisa, confiable y oportuna en las bases de datos”, *Revista Nacional de Administración*, vol. 2, n.º 2, pp. 145-154, 2011. [En línea]. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4716521>. [Accedido: 29 Abr., 2023].
- [10] D. Kececioğlu, *Reliability Engineering Handbook*, vol. 1, 1991.
- [11] Y. H. Liang, “Analyzing and forecasting the reliability for repairable systems using the time series decomposition method”, *International Journal of Quality and Reliability Management*, vol. 28, n.º 3, pp. 317-327, mar. 2011. doi: 10.1108/0265671111109919.

- [12] N. D. Singpurwda, “Estimating reliability growth (or deterioration) using time series analysis”, *Naval Research Logistics Quarterly*, vol. 25, n.º 1, pp. 1-14, 1978. doi: <https://doi.org/10.1002/nav.3800250102>.
- [13] N. Singh, “Forecasting time-dependent failure rates of systems operating in series and/or in parallel”, *Microelectron. Reliab.*, vol. 34, n.º 3, pp. 391-403, 1994.
- [14] G. Box, G. Jenkins, G. Reinsel y G. Ljung, *Time Series Analysis: Forecasting and Control*, 5ª ed., Wiley, 2015.
- [15] J. J. Murphy, *Análisis técnico de los mercados financieros*, España, 2000.
- [16] F. Bastidas-Alarcón, E. Cruz-Siguenza, C. Cepeda-Godoy y R. Velásquez-Carvajal, “Análisis de la fiabilidad de una máquina de serigrafía semiautomática, utilizando métodos de distribución de probabilidad continua”, *593 Digital Publisher CEIT*, vol. 6, n.º 4-1, pp. 71-81, 2021. doi: [10.33386/593dp.2021.4-1.577](https://doi.org/10.33386/593dp.2021.4-1.577).
- [17] L. Alberto. Mora Gutiérrez, *Mantenimiento: planeación, ejecución y control*, 1 Ed. México: Alfaomega, 2009. [En línea]. Disponible en: <https://www.alfaomega.com.mx/default/mantenimiento-planeacion-ejecucion-y-control-5331.html>. [Accedido: 1 mayo, 2023].
- [18] D. Alajbeg, Z. Bubaš y J. Vukas, “The effectiveness of the 50/200 dual exponential moving average crossover on the S&P 500”, *ASBBS eJournal*, vol. 8, n.º 1, pp. 8-20, 2012. [En línea]. Disponible en: <https://www.semanticscholar.org/paper/The-Effectiveness-of-the-50-200-Dual-Exponential-on-Alajbeg-Bubas/9b071e010877889aa598f0c42e9589ec93753de3>. [Accedido: 10 Jun., 2023].