

Análisis de Frecuencias de la Señal de Corriente y Aprendizaje Autónomo para el Diagnóstico de Fallas en Líneas de Cucharas de Dragas

Andrés Esteban Rivera Osorio¹, Sebastián Sarmiento Ruiz², Fernando Jesús Guevara Carazas³

¹ Universidad Nacional de Colombia. Grupo de investigación en Gestión Operación de Mantenimiento de Activos GOMAC, Facultad de Minas, ariveraos@unal.edu.co

² Mineros Aluvial S.A.S. Ingeniería de Confiabilidad y Lubricación, sebastian.sarmiento@mineros.com.co

³ Universidad Nacional de Colombia. Grupo de investigación en Gestión Operación de Mantenimiento de Activos GOMAC, Facultad de Minas, fjguevarac@unal.edu.co

RESUMEN

Este estudio presenta un sistema de diagnóstico de fallas basado en el análisis espectral de la señal de corriente y aprendizaje autónomo para la detección temprana de anomalías en la operación de dragas. Mediante la Transformada Rápida de Fourier (FFT), se identifican firmas espectrales que correlacionan condiciones operativas con fallas en la línea de cucharas. El sistema de monitoreo se implementó en un PLC Siemens S7-1200, permitiendo la comunicación con un computador que ejecuta el procesamiento de la FFT en tiempo real. Además, el modelo de aprendizaje autónomo se entrena continuamente con los datos obtenidos, mejorando progresivamente su capacidad de detección y clasificación de eventos críticos. Los resultados indican que este enfoque permite optimizar el mantenimiento predictivo, reducir los tiempos de inactividad y mejorar la confiabilidad operativa de la draga.

Palabras clave: Diagnóstico de fallas, Mantenimiento predictivo, Transformada de Fourier, Análisis de frecuencia, Aprendizaje autónomo.

ABSTRACT

This study presents a fault diagnosis system based on spectral analysis of current signals and autonomous learning for early anomaly detection in dredgings operations. Through the Fast Fourier Transform (FFT), spectral signatures are identified to correlate operational conditions with bucket line failures. The monitoring system was implemented on a Siemens S7-1200 PLC, enabling communication with a computer that performs real-time FFT processing. Additionally, the autonomous learning model is continuously trained with the obtained data, progressively improving its ability to detect and classify critical events. The results indicate that this approach optimizes predictive maintenance, reduces downtime, and enhances the operational reliability of the dredge.

Keywords: Fault Diagnosis, Predictive Maintenance, Fourier Transform, Frequency Analysis, Autonomous Learning.

1. Introducción

La exploración y explotación de oro mediante minería aluvial se emplean equipos tales como las dragas de succión (DS) y dragas de cucharas (DC), que extraen material aurífero de depósitos aluviales, en los lechos de los ríos. La empresa en donde se desarrolló este trabajo emplea tecnologías avanzadas y procesos de extracción que priorizan la sostenibilidad, como la separación por gravimetría, evitando el uso de agentes químicos contaminantes. Con más de 50 años de experiencia, la compañía busca maximizar la producción de oro mientras minimiza el impacto ambiental, adoptando prácticas responsables y un enfoque en la sostenibilidad operativa. Cabe resaltar que el modo de operar de la compañía es único en América Latina [1][3].

En este proceso de extracción las DC, desempeñan un papel fundamental en la extracción continua de oro, cualquier interrupción en su funcionamiento puede generar paradas costosas y afectar la productividad [1][3]. Las DC están construidas sobre estructuras tipo planchón de hierro y diseñadas para extraer material del lecho del río mediante una cadena continua de cucharas. Cuentan con un sistema de malacates que controlan el movimiento, una transmisión principal que acciona la línea de cucharas y un tambor inferior donde se realiza la extracción del material. Además, incorporan sistemas de potencia como variadores de frecuencia y reguladores de presión, así como sistemas de automatización basados en PLC, que optimizan su operación.

En la Figura 1 se observa la estructura principal de la draga, que incluye el sistema de transmisión, la línea de cucharas utilizada para la extracción de material del lecho del río, y las plataformas de operación.



Fig 1. Draga de cucharas: Fuente Mineros Aluvial

De trabajos previos, enfocados en incrementar la confiabilidad y ya disponibilidad de los equipos podemos descartar dos modos de falla principalmente la salida de la línea de cucharas del tambor inferior y la obstrucción causada por objetos, (como maderos que se atraviesan en el tambor). Estos eventos pueden provocar daños severos en los componentes claves del equipo, como la transmisión principal, lo que genera tiempos de inactividad prolongados, elevando los costos operativos y afectando la continuidad de la producción. Según datos suministrados por el área de confiabilidad y lubricación en el año 2024, se registraron 54 eventos relacionados a la línea de cucharas, los cuales sumaron un total de 4.471 minutos de tiempo perdido. Lo que resalta la necesidad de implementar soluciones efectivas para detectar y reducir estas situaciones de manera oportuna.

En este sentido con la finalidad de reducir la ocurrencia de estos eventos el equipo de ingeniería de confiabilidad y lubricación trabajó para implementar un proceso de detección temprana y eficaz de eventos críticos. De esta forma la aplicación del análisis de señales de corriente a los

motores de transmisión principal de las DC, como mencionan [2][4], representa una oportunidad para monitorear el comportamiento de los equipos en tiempo real. Por su parte La Transformada Rápida de Fourier (FFT) es un algoritmo que permite descomponer las señales de corriente en el dominio de la frecuencia, permitiendo una visualización detallada de las condiciones operativas y la identificación de patrones de frecuencia asociados a fallas inminentes, como la salida de la línea de cucharas del tambor o la obstrucción causada por maderos [1]. Su formulación matemática se expresa como en la ecuación 1

$$x[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] * e^{-j(2\pi/N)kn} \quad [1]$$

En este trabajo, la FFT se aplicó sobre la señal de corriente del motor de la transmisión principal para extraer firmas espectrales y detectar anomalías operativas, como la ralentización del sistema por obstrucciones en la línea de cucharas. Esta capacidad de analizar variaciones espectrales ofrece un enfoque preventivo para anticipar anomalías y activar alertas tempranas, mejorando la confiabilidad operativa y reduciendo riesgos significativos.

2. METODOLOGIA

En la Figura 1, presentamos las etapas del método desarrollado para el caso de estudio.



Fig 2 Método. Fuente Elaboración Propia

A continuación, se describe detalladamente cada etapa del método.

2.1 Definición del Sistema

En esta etapa, se define claramente el sistema a estudiar y componentes que lo conforman. También se recopila toda la información posible, desde datos hasta actividades de mantenimiento.

2.2 Adquisición y Preprocesamiento de Datos

En esta etapa se analizan los datos disponibles para identificar información relevante que pueda ser utilizada en el diagnóstico de fallas. Se revisan registros de corriente, condiciones operativas y eventos previos, con el objetivo de estructurar y limpiar la información. Además, se aplican técnicas de filtrado y normalización para mejorar la calidad de los datos antes de su análisis en el dominio de la frecuencia.

2.3 Análisis de Frecuencia con FFT

En esta etapa, los datos procesados son analizados en el dominio de la frecuencia mediante la FFT. Esta técnica permite identificar patrones espectrales y variaciones en la señal de corriente que podrían estar asociadas a fallas en la línea de cucharas. El análisis de frecuencia facilita la detección de anomalías operativas, proporcionando una base para el diagnóstico predictivo y la generación de alertas tempranas.

2.4 Clasificación y Diagnóstico de Fallas

Una vez obtenido el análisis de frecuencia, se procede a interpretar los resultados para determinar la presencia de anomalías en el sistema. Los patrones de frecuencia son comparados con registros históricos y se establecen umbrales que permitan diferenciar entre condiciones normales y fallas potenciales.



2.5 Implementación de Alertas y Validación

En esta etapa, se establecen mecanismos de alerta basados en los patrones de frecuencia, permitiendo notificar oportunamente sobre posibles fallas. Al igual que, se definen niveles de criticidad y se diseñan criterios para activar alarmas en tiempo real. Adicionalmente, se validan los resultados del sistema comparándolos con datos históricos y registros de fallas previas, asegurando su precisión y efectividad antes de su implementación operativa. Este proceso garantiza que las alertas generadas sean confiables y contribuyan a la optimización del mantenimiento predictivo.

3. APLICACIÓN DEL METODO.

3.1 Definición del Sistema

Las DC son equipos flotantes empleados en la minería aluvial para extraer material aurífero del lecho de los ríos mediante un sistema de cucharas montadas sobre una cadena sin fin, las DC operan en entornos de difícil acceso y permiten una extracción continua y eficiente del material [6]. Su estructura incluye componentes como el malacate de escala y proa, el sistema de transmisión principal (mecánico o hidráulico), cribas giratorias para la separación del material y un sistema hidráulico que facilita el movimiento de los mecanismos [7].

3.2 Adquisición y Preprocesamiento de Datos

La empresa cuenta con un sistema de adquisición de datos y una base de datos que registra los operativos de los últimos dos años, incluyendo eventos relacionados con fallos en las DC [6]. Para este estudio, se enfocó en la salida de línea, debido a su impacto en la operatividad y mantenimiento de los equipos [7]. Con el fin de optimizar el análisis, los datos fueron filtrados y preprocesados, eliminando inconsistencias y ruidos en las mediciones. Además, se aplicó una normalización mediante la sustracción de la media, lo que permitió centrar las frecuencias en cero y mejorar la interpretación de las amplitudes [8]. El análisis

de datos de forma distributiva estableció un histograma que permite identificar la variabilidad de los registros y en consecuencia determinar patrones relevantes para el diagnóstico de fallos (Figura 3) [1].

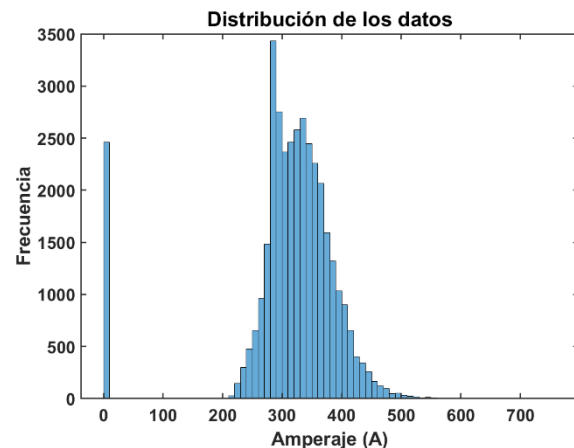


Fig 3 Histograma. Fuente (Elaboración propia)

A partir del conjunto de datos analizados, se seleccionó un día específico en el que ocurrió un evento de paro. Este día fue tomado como referencia para estudiar en detalle las características de la señal de corriente y su comportamiento antes, durante y después del evento [2]. La selección de este caso permitió establecer comparaciones con otros períodos de operación normal, facilitando la identificación de cambios en las frecuencias de la señal asociados a la ocurrencia del fallo [3].

3.3 Análisis de Frecuencia con FFT

El análisis de la señal de corriente del motor de escala izquierdo se evaluó con la metodología FFT a los datos de los días 23-28 de septiembre de año 2024 con una frecuencia de muestreo de 1 Hz. La elección del motor se dio por su rol de maestro en la configuración del variador de velocidad, se eliminó la media de la señal para centrar las frecuencias en cero y resaltar variaciones clave. Posteriormente, se calcularon los espectros de amplitud considerando solo las frecuencias positivas. La Figura 4 muestra la comparación de

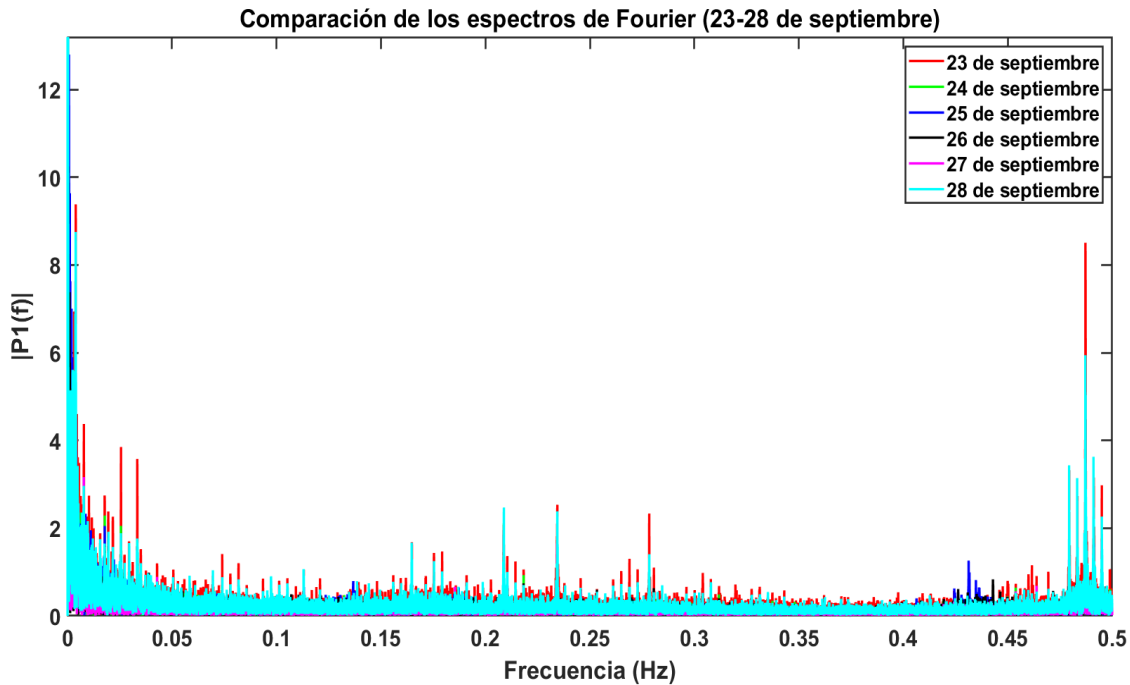


Fig 4. Comparación de los espectros de la FFT

los espectros de Fourier, evidenciando las frecuencias asociadas a la falla del 25 de septiembre.

3.4 Clasificación y Diagnóstico de Fallas

El análisis espectral permitió evidenciar que el día 25 de septiembre se presentó un aumento en la amplitud de la señal a 0.431277 Hz (2.318 segundos) mediante la FFT de la corriente del motor. Este incremento fue provocado por la obstrucción de un palo en el tambor inferior, lo que resultó en una ralentización en el movimiento de las cucharas [8]. La correlación entre las variaciones de corriente y los eventos mecánicos ha sido ampliamente documentada en estudios de diagnóstico de máquinas eléctricas mediante análisis de vibraciones y señales de corriente [9][10].

3.5 Implementación de Alertas y Validación

El sistema de alertas en tiempo real se implementó en Python utilizando la biblioteca Snap7, lo que permite la comunicación entre un PLC Siemens

S7-1200 y el computador que ejecuta la FFT [12]. Este PLC es parte del sistema de control de la draga y se encarga de la adquisición y procesamiento de datos en campo, recibiendo señales de corriente del motor y gestionando su análisis en tiempo real. Se configuró una ventana móvil de 330 datos, equivalente a 30 segundos con una frecuencia de muestreo de 11 datos por segundo, y las alarmas se establecieron en función de picos de amplitud en frecuencias clave, enviando alertas al PLC para su visualización en la interfaz de control y su posterior respuesta operativa [13]. Además, se está desarrollando un clasificador de firmas espectrales para identificar patrones de fallas y anticipar anomalías en la operación de la draga, donde este caso sirve como modelo de entrenamiento para mejorar progresivamente la precisión del sistema mediante un modelo de aprendizaje autónomo. Este enfoque optimiza la estrategia de mantenimiento predictivo al mejorar la detección de eventos críticos y permite una respuesta más rápida ante posibles

fallas, asegurando una operación más eficiente y confiable.

4. RESULTADOS

El análisis espectral permitió evidenciar el fenómeno de ralentización del sistema cuando ocurre una obstrucción en el tambor inferior. La Figura 4 muestra el aumento en la amplitud de la señal en 0.431667 Hz, registrado 10 minutos antes de la falla. Esta frecuencia, ausente en condiciones normales, indica una alteración en el movimiento de las cucharas, lo que permite detectar el evento antes de que cause una detención completa del sistema.

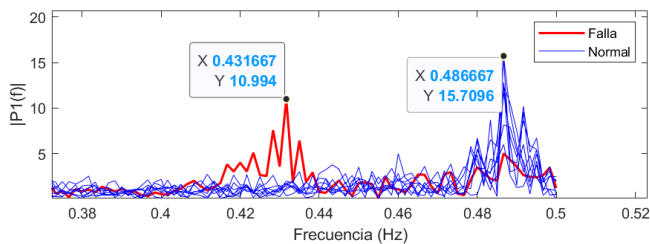


Fig 5. Variación espectral de la señal de corriente 10 minutos antes de la falla.

Además, esta implementación representa un avance significativo para la empresa, ya que la conexión entre el PLC y Python abre la posibilidad de desarrollar nuevos proyectos de monitoreo y automatización en las DC. Este enfoque tecnológico permitirá la optimización de procesos y la integración de sistemas inteligentes en las operaciones mineras.

Desde su implementación el 10 de diciembre de 2024, el sistema ha estado operando sin registrar nuevos eventos de salida de línea de cucharas en la draga 10. Se espera que este modelo pueda aplicarse en otras dragas de cucharas (DC), ampliando su impacto en la confiabilidad y eficiencia del sistema.

5. CONCLUSIONES

El presente trabajo demuestra que la aplicación de la FFT en el monitoreo de corriente es una estrategia efectiva para detectar y anticipar fallas en sistemas mecánicos complejos y permite anticipar maniobras que eviten fallas de mayor impacto. La detección de patrones espectrales anómalos permite generar alertas preventivas, lo que optimiza la toma de decisiones en el mantenimiento.

La implementación de Snap7 en Python ha facilitado la comunicación en tiempo real entre el PLC y el sistema de análisis, estableciendo una base tecnológica que permitirá futuros desarrollos en automatización y monitoreo remoto en la empresa.

Adicionalmente, este enfoque ha sentado un precedente en la digitalización de procesos de mantenimiento, abriendo la puerta a la integración de modelos predictivos más avanzados. La escalabilidad del sistema propuesto permitirá su adaptación a otras dragas, fortaleciendo la confiabilidad operativa y reduciendo costos asociados a fallas imprevistas.

6. REFERENCIAS

- [1] J. Bustamante Duarte, “Optimización del mantenimiento en dragas de minería aluvial mediante análisis espectral,” *Revista de Ingeniería y Tecnología Minera*, vol. 30, no. 2, pp. 45–58, 2022.
- [2] L. Henao Sánchez, “Monitoreo y detección de fallos en dragas de cucharas usando señales de corriente,” Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia, 2021.
- [3] M. Baena George, “Análisis de fallos en la transmisión de dragas de minería aluvial mediante herramientas de diagnóstico predictivo,” *Congreso Latinoamericano de Ingeniería de Mantenimiento*, Lima, Perú, 2023.



[4] J. Acuña Paz, "Implementación de técnicas de machine learning para la predicción de fallos en maquinaria pesada," Tesis de Doctorado, Universidad Politécnica de Madrid, España, 2024.

[5] B. Dreyfus, R. Martínez y C. Legrand, "Metodologías basadas en datos para el mantenimiento predictivo en la Industria 4.0," Journal of Industrial Engineering & Data Science, vol. 15, no. 4, pp. 78–92, 2022.

[6] Y. Baena, Proyecto de mantenimiento de dragas de cucharas en minería aluvial, Trabajo de grado, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia, 2023.

[7] R. A. Bustamante Duarte, Implementación de un plan de lubricación para los equipos de las dragas de cuchara en la empresa Mineros Aluvial S.A., Tesis de grado, Institución Universitaria Pascual Bravo, Medellín, Colombia, 2022.

[8] V. Barkov, S. Pavlov, y A. Kudryavtsev, "Vibration Diagnostics of Electric Machines Using Current Signal Analysis", IEEE Transactions on Industry Applications, 2010.

[9] R. B. Randall, Vibration-based Condition Monitoring: Industrial, Aerospace and Automotive Applications, Wiley, 2011.

[10] H. Belt y E. Deckers, "Vibration Monitoring of Rotating Machinery Using Motor Current Signature Analysis (MCSA)", Journal of Mechanical Engineering, 2013.

[11] S. W. Smith, The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing, California Technical Publishing, 1997.

[12] Snap7: An open source Siemens S7 communication library, GitHub Repository,

Disponibile en:
<https://github.com/gavanderhoorn/snap7>

[13] A. García, J. Torres, y M. Ramírez, "Industrial Automation with Snap7: Real-time Data Acquisition and Processing", International Journal of Control and Automation, vol. 16, no. 4, pp. 112-125, 2023

Andrés Esteban Rivera Osorio
Estudiante de Ingeniería de Control en la Universidad Nacional de Colombia, con énfasis en Gestión de Activos. Actualmente, realiza su trabajo de grado sobre análisis de frecuencia mediante Transformada Rápida de Fourier aplicada a motores en maquinaria industrial.
Correo: ariveraos@unal.edu.co
Cel: +573108411620
Dirección: Cra 33 #28-34 Guatapé, Colombia

Sebastián Sarmiento Ruiz
Ingeniero Mecánico con especialización en Mantenimiento por la Universidad Nacional de Colombia. Actualmente, se desempeña como líder del proceso de Confiabilidad y Lubricación en Mineros Aluvial S.A.S.
Correo: sebastian.sarmiento@mineros.com.co
Cel: +573176368876
Dirección: Medellín, Colombia

Fernando Jesús Guevara Carazas PhD.
Profesor e investigador de la Universidad Nacional de Colombia, ingeniero mecánico, Líder del Grupo de investigación Gomac (gestión, operación y mantenimiento de activos)
Correo: figuevarc@unal.edu.co
Cel: +573148582415
Dirección: Cra 56A #61-24 Medellín, Colombia