

Predictive Maintenance Model based on Dispatch Analysis to Increase Effective Utilization

Pedro Alcarraz-Rojas, BSc¹, Fabiola Legoas-Farias, BSc¹, Luis Arauzo Gallardo, MSc¹, Carlos Raymundo, PhD¹
¹Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Peru, u201524036@upc.edu.pe, u201512832@upc.edu.pe, pccilara@upc.edu.pe, carlos.raymundo@upc.edu.pe

Abstract– This research work seeks to implement a predictive maintenance system in transport equipment in a surface mine in order to increase the percentage of effective utilization. The investigation begins with the collection and identification of data in the study area, later the analysis of the data stored in the Dispatch system will be carried out with the Lean Six Sigma methodology, which will allow the identification of the main causes of operational delays. present in the studied process. Once the operational delays that hinder the adequate development in the transport of ore and waste have been identified, the improvement objectives and the predictive maintenance plans for the equipment studied will be set. This research aims to improve the processes that influence the hauling cycle, in addition to the implementation of an adequate predictive maintenance system, it will be possible to improve the operational indexes of the transport equipment, as well as reduce the costs and downtime of the equipment. miners.

Keywords-- Predictive maintenance; equipment; haulage; Dispatch; Lean Six Sigma.

Digital Object Identifier (DOI):
<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2021.1.1.584>
ISBN: 978-958-52071-8-9 ISSN: 2414-6390

Modelo de Mantenimiento Predictivo basado en el Análisis del Dispatch para el Incremento de la Utilización Efectiva

Pedro Alcarraz-Rojas, BSc¹, Fabiola Legoas-Farias, BSc¹, Luis Arauzo Gallardo, MSc¹, Carlos Raymundo, PhD¹
¹Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Peru, u201524036@upc.edu.pe, u201512832@upc.edu.pe, pccilara@upc.edu.pe, carlos.raymundo@upc.edu.pe

Abstract– En el presente trabajo de investigación se busca implementar un sistema de mantenimiento predictivo en equipos de transporte en una mina superficial con la finalidad de aumentar el porcentaje de utilización efectiva. La investigación inicia con la recolección e identificación de datos en el área de estudio, posteriormente se realizará el análisis de los datos almacenados en el sistema Dispatch con la metodología del Lean Six Sigma, la cual permitirá la identificación de las principales causas de las demoras operativas presentes en el proceso estudiado. Una vez identificadas las demoras operativas que obstaculizan el desarrollo adecuado en el transporte de mineral y desmonte se plantearán los objetivos de mejora y los planes de mantenimiento predictivo para los equipos estudiados. Con esta investigación se pretende mejorar los procesos que influyen en el ciclo de acarreo además con la implementación de un adecuado sistema de mantenimiento predictivo se podrá mejorar los índices operacionales de los equipos de transporte, así como reducir los costos y tiempos de inoperatividad de los equipos mineros.

Keywords– Mantenimiento predictivo; equipos; acarreo; Dispatch; Lean Six Sigma.

I. INTRODUCCIÓN

En el presente estudio de investigación se realizará un análisis de los datos brindados por el sistema Dispatch, el cual maneja toda la información histórica y en tiempo real de la operación minera en el ciclo de carguío y acarreo para implementar un mantenimiento predictivo. Mediante este trabajo de investigación se pretende aplicar el modelo Lean Six Sigma para determinar donde se encuentra la falla mediante el proceso DMAIC aplicado a datos estadísticos, para poder analizar las causas del problema y establecer un proceso de mejora.

En un mercado competitivo, como lo es la minería y junto con el apremiante clima económico actual, las compañías mineras deben asegurar el cumplimiento del plan de producción e inversión, como también buscar adicionar valor al negocio, a través de la reducción de los costos de operación a lo largo del proyecto

En las operaciones mineras, puntualmente en la etapa de carguío y acarreo es importante reducir los tiempos inoperativos, las fallas de los equipos, los costos y las demoras principales, puesto que genera una baja productividad e ineficiencia en la producción.

En el análisis de las demoras operativas presentes en los camiones mineros del ciclo de acarreo de una mina superficial se han podido determinar las principales causas entre ellas se tienen las restricciones en la operación óptima que alberga los

ángulos de giro, las gradientes y los coeficientes de rodamiento, además también influye las condiciones del sitio que pueden ser físicas o climáticas. Los sistemas de mantenimiento actual que presentan las empresas mineras están enfocados a solucionar las fallas presentadas mas no a predecir y actuar antes de producirse una falla catastrófica, es por lo que los camiones deben someterse a mantenimientos cada cierto periodo de tiempo lo que genera horas de parada y tiempos improductivos.

Mediante la implementación del mantenimiento predictivo se quiere lograr un incremento en la utilización de los equipos mineros. Esta investigación nos permitirá conocer las variables que causan la ineficiencia operacional, los tiempos inoperativos y demoras principales para luego plantear objetivos y establecer una línea de mejora en el ciclo de acarreo.

II. ESTADO DE ARTE

A. Sistema de mantenimiento predictivo

Los camiones y palas son los principales sistemas de carga y transporte utilizado en la minería superficial y requieren de una inversión que puede llegar hasta los miles de millones de dólares, es por ello que la mayoría de las empresas mineras busca alternativas que puedan reducir sus costos y tiempos [1]. Además, existe una relación directa entre el sistema de manejo y transporte de materiales y las plantas de procesamiento de minerales, es por esta razón que cualquier retraso genera costos adicionales al presupuesto del área de transporte, el cual ya representa el 60% del total de costos operativos en una mina superficial [2]. Existen dos enfoques que permiten disminuir el costo de acarreo y transporte, el primero se basa en utilizar camiones más grandes para poder transportar mayor volumen de mineral sin embargo se requiere una inversión adicional que no todas las empresas pueden hacer; el segundo enfoque se centra en reducir los costos a partir de la toma de decisiones óptimas utilizando técnicas de investigación de operaciones [3]. A partir de la implementación del segundo enfoque, las empresas mineras utilizan en la actualidad los sistemas de gestión de flotas debido a que se pueden tomar decisiones en tiempo real para optimizar el traslado del mineral de un punto a otro, así como añadir funciones que permitan almacenar y analizar el estado de los camiones mineros [2].

B. Sistema de Gestión de Flotas

Entre los principales sistemas de gestión de flotas se encuentra el Dispatch, que permite gestionar el trabajo de los camiones y controlar el consumo de combustible y aceites, además te permite planificar el mantenimiento y así mejorar su rendimiento; este software además puede controlar el sonido de los vehículos, almacena y reporta los tiempos de retraso e inactividad para poder tomar decisiones inmediatas. [4].Adicionalmente a la implementación de un sistema de gestión de flotas es necesario tener un adecuado plan de mantenimiento de equipos en el sector minero para evitar tiempos de paros excesivos, se debe tener en cuenta que el proceso de mantenimiento en equipos mineros es tedioso ya que consta de varios componentes; existen 3 tipos de mantenimiento, el primero es el correctivo que se realiza cuando se produce una falla; el segundo es el preventivo que se realiza antes de que se produzca la falla sin tener en cuenta el estado del equipos; y por último, el predictivo que proporciona información continua sobre el estado de la maquina y se planifica el mantenimiento en periodos de tiempos adecuados [5].

C. Lean Six Sigma

Existen distintos métodos para analizar la información necesaria para implementar un sistema de mantenimiento predictivo, pero siempre se realizará en 3 pasos: adquisición de datos, procesamiento de datos y toma de decisiones. Contar con una base de datos que represente las variables operacionales de cada equipo minero es fundamental, este registro debe coleccionar distintos eventos con una marca de tiempo determinado, un mensaje que describa dicho evento y también un código que represente la categoría a la que pertenece.

En consecuencia, según [6] en la industria minera se deben enfrentar los problemas operacionales que impiden cumplir con los objetivos pactados de cada proceso, debido a eso con el fin de mejorar la capacidad del procesamiento de fabricación de los minerales de hierro se utilizó la metodología del Lean Six Sigma, la cual se centró en el análisis de residuos mediante el mapeo de las actividades y se determinó aquellos procesos que no contaban con un rendimiento de calidad; luego de eliminar los defectos presentados en cada etapa del procesamiento, el rendimiento mejoró de manera drástica.

Entre las aplicaciones más sobresalientes de esta técnica, tenemos que nos va a permitir construir una línea base y a partir de ella detectar los equipos que no cumplan con los estándares determinados. Como se puede apreciar, esta técnica está basada en la mejora continua de los procesos a los cuales se aplica, por lo tanto, es la mejor opción para lograr implementar un sistema de mantenimiento predictivo en el sector minero debido a que es capaz de medir y evaluar el desempeño de los equipos analizados, pero sobre todo controlar el rendimiento e identificar la variabilidad de los datos.

III. APORTE

A. Selección de Indicadores de Gestión

Los indicadores de gestión nos reflejan los resultados de las acciones tomadas en el proceso de carguío y acarreo. Para la identificación de estas se elaboro un criterio de selección, las cuales son:

- Pertinencia
- Funcionalidad
- Disponibilidad
- Confiabilidad
- Utilidad

Con toda la información brindada en una base de datos, realizaremos el criterio de selección para identificar los indicadores de gestión que se ajusten a las necesidades de la investigación.

B. Evaluación de las demoras operativas

Se identificará los tiempos de perdida potenciales por incidentes operacionales de la población de equipos mineros. También, se identificará los tiempos de disponibilidad y utilización. Estas variables serán obtenidas de la base de almacenamiento de datos Dispatch, el cual es un sistema de Administración Minera que maneja toda la información histórica y en tiempo real de la operación minera, proporcionando asignaciones optimas y automáticas para equipos de acarreo. Luego de identificar las variables correspondientes, se procederá a calcular el porcentaje de perdida operacionales (%PO).

$$\%PO[\%] = \frac{T. Peridas Operacionales}{T. Disponible} \times 100\%$$

El índice de disponibilidad física.

$$DF = \frac{Horas Operacionales + Horas reserva}{Horas Habiles}$$

El indice de mantenimiento.

$$IM = \frac{Horas Operacionales}{Horas de mantenimiento}$$

Por último, el índice de utilización.

$$IU = \frac{Horas Operacionales}{Horas de operacionales + Horas reserva}$$

C. Establecer la relación entre el sistema de mantenimiento actual y el porcentaje de utilización efectiva.

Se verificará el sistema de mantenimiento existente en la unidad minera. Así mismo, se validará los reportes de fallas y mantenimientos, para evaluar si los equipos mineros de

acarreo se encuentran en optimas condiciones para su funcionamiento. Para poder identificar el porcentaje de utilización efectiva se tomará en cuenta la siguiente fórmula:

$$IU = \frac{\text{Horas Operacionales}}{\text{Horas de operacionales} + \text{Horas reserva}}$$

La inactividad de los equipos nos ayudará a determinar el porcentaje de utilización efectiva diaria, así como promediar el porcentaje de utilización efectiva en periodos de tiempos determinamos, en este caso específicamente se trabajará con los porcentajes mensuales. Para poder establecer la relación existente entre el sistema de mantenimiento y los porcentajes de utilización efectiva se realizará gráficos comparativos con datos históricos o pertenecientes a otro periodo de tiempo donde el sistema de mantenimiento no era el actual, así como se realizará cuadros comparativos con data simulada que nos ayudará a identificar el cambio en el porcentaje de utilización efectiva a partir del sistema de mantenimiento que se maneje en la unidad minera. Al establecer la relación podremos identificar que acciones son necesarias cambiar o modificar para poder disminuir el tiempo de inactividad del equipo minero de acarreo (camión) e incrementar sus horas operacionales sin exceder lo establecido por el área encargada.

D. Analizar los beneficios del sistema de mantenimiento predictivo con la optimización del indicador de utilización efectiva

En primer lugar, se procederá a analizar las variables obtenidas del sistema de gestión de flotas Dispatch, entre ellas tenemos, la cantidad de camiones, sus horas operacionales y de mantenimiento, los reportes de fallas y las condiciones del entorno según el recorrido asignado. El análisis de estos datos se realizará con la ayuda de los programas Microsoft Excel y PostgreSQL.

Los datos seleccionados pasarán por una etapa de selección para poder identificar y descartar datos duplicados o vacíos. Esta selección nos ayudará a reducir y poder clasificar la información, además junto con los datos analizados en el Objetivo N°2 se procederá a plantear planes de mejora. Los resultados serán obtenidos a partir de la implementación de los planes de mejora, de esta manera se podrá comparar los cambios porcentuales en la utilización efectiva, así como identificar las principales ventajas y cambios a partir de la implementación.

IV. VALIDACIÓN

A. Escenario de Validación

La investigación se realizó en una operación minera a tajo abierto en la región Apurímac, con una producción diaria de 186,344 toneladas. Está ubicada en el distrito de Challhuahuacho y Coyllurqui pertenecientes a la provincia Cotabambas y en el distrito Progreso que pertenece a la provincia de Grau, ambas en la región Apurímac. Se encuentra

ubicada al sureste de la ciudad de Lima con una distancia de 565 km.

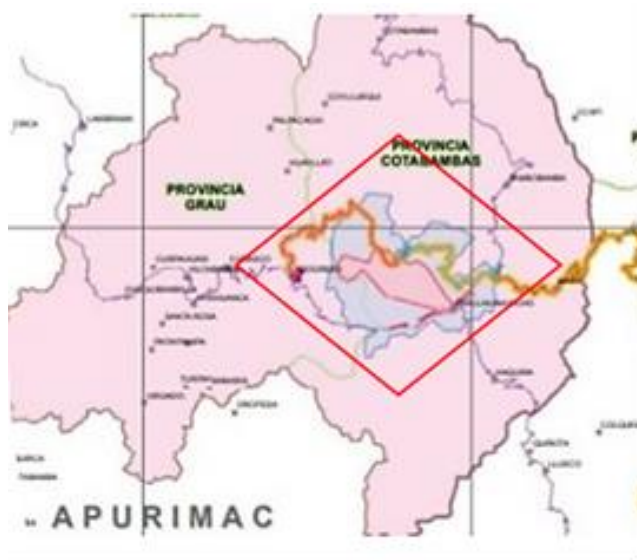


Fig. 1 Mapa de Ubicación

Se estudiaron 92 camiones de marca Komatsu modelo 930E. En la Tabla N°1 se identificó las principales fallas en las 4 áreas más significativas de la empresa. El estudio fue realizado a partir de los registros almacenados del sistema de gestión de flotas

TABLE I
FALLAS SEGÚN LAS PRINCIPALES ÁREAS DE LA EMPRESA

Área de fallas	N° Fallas
Área de minado	418
Área Metalúrgica	562
Área de Mantenimiento	2345
Área de Ingeniería y Planificación	754

El área de mantenimiento está conformada por 4 subáreas: acarreo, carguío, perforación y equipos auxiliares. En esta clasificación, la subárea de acarreo presentó el mayor número de incidencias en el 2018 con 1,642 fallas representando el 70% del total de fallas.

B. Diseño de Validación

1) Identificar las principales demoras operativas e indicadores de gestión.

En el año 2018, las demoras operativas no programadas sumaron un total de 499.98 horas con una frecuencia de ocurrencia de 1599 veces. La principal demora operativa no programada fue producida por el sistema de motor del equipo minero, 572 veces al año con una duración total de 144 horas aproximadamente.

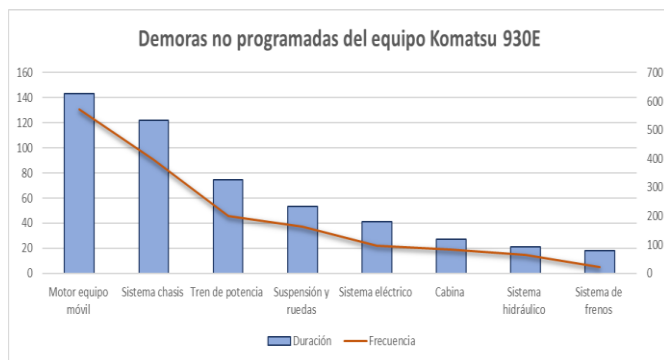


Fig. 2 Demoras Operativas en el año 2018

El sistema de gestión de flotas utilizado por la unidad minera también registró y generó los indicadores operacionales que presentaron los camiones Komatsu 930E durante el periodo 2018.

TABLE II
INDICADORES DE GESTIÓN

Indicadores	Disponibilidad	Utilización	MTBF	MTRR
Ene-18	78.3	80.3	38	4
Feb-18	77.3	79.2	41	5
Mar-18	75.8	79.6	38	3
Abr-18	81.5	79.2	35	3
May-18	74.8	79.9	34	3
Jun-18	77.4	80.7	42	3
Jul-18	78.7	80.9	45	3
Ago-18	82.1	79.7	40	3
sep-18	83.6	79.9	37	3
Oct-18	74.3	80	28	5
Nov-18	76.2	80.2	29	5
Dic-18	74.9	79.8	31	3

1) Calcular las horas operativas

A partir de los indicadores de gestión obtenidos se pudo conocer la distribución de tiempos diarios. Para fines de la investigación se obtuvo los promedios mensuales de las horas, que servirán para poder lograr las comparaciones respectivas con el sistema de mantenimiento predictivo evaluado (Table 3).

TABLE III
DISTRIBUCIÓN DE TIEMPOS

Mes	Nº días	T. Nominal (hrs mensual)	T. Disp (hrs mensuales)	T. No Disp. (hrs mensuales)	T. Disp (hrs diarias)	T. No Disp. (hrs diarias)	T. Operativo (hrs diarias)	T. Dem. Prog (hrs diarias)	T. Dem. No Prog. (hrs diarias)	T. Util. (hrs diarias)
Enero	31	744	582.552	161.488	18.792	5.208	16.792	0.87	2.438	13.848
Febrero	28	672	519.456	152.544	18.552	5.448	16.552	0.96	2.491	13.101
Marzo	31	744	563.952	180.048	18.192	5.808	16.192	0.84	2.463	12.889
Abril	30	720	586.8	133.2	19.56	4.44	17.56	0.88	2.772	13.908
Mayo	31	744	556.512	187.488	17.952	6.048	15.952	0.88	2.326	12.746
Junio	30	720	557.28	162.72	18.576	5.424	16.576	0.93	2.269	13.377
Julio	31	744	585.528	158.472	18.888	5.112	16.388	0.86	2.366	13.662
Agosto	31	744	610.824	133.176	19.704	4.296	17.704	0.89	2.704	14.11
Setiembre	30	720	601.92	118.08	20.064	3.936	18.064	0.9	2.731	14.433
Octubre	31	744	552.792	191.208	17.832	6.168	15.832	0.89	2.276	12.666
Noviembre	30	720	548.62	177.38	18.287	5.713	16.287	0.88	2.345	13.062
Diciembre	31	744	557.256	186.744	17.976	6.024	15.976	0.93	2.297	12.759

2) Sistema de mantenimiento predictivo

En el año 2018, la unidad minera realizaba Mantenimientos Preventivos a los camiones Komatsu 930E, esto consistía en trasladar el equipo hacia el área de mantenimiento cada 250 horas de uso, lo que generó la disminución de las horas disponibles del equipo debido a que cada parada programada tenía una duración de 10 horas. Adicionalmente, se realizaba inspecciones cada 125 horas de uso que consistía en hacer mediciones de aceites, refrigerantes, sistema de frenos y suspensión y ruedas. Para poder agilizar el tiempo de mantenimiento la empresa optó por comprar nuevos repuestos, para disminuir los tiempos de limpieza de piezas lo que desencadenó un sobrecosto en el área de mantenimiento.

Para fines de la investigación, se planteó evaluar un sistema de mantenimiento predictivo que realizará paradas obligatorias cada 500 horas de uso, así como inspecciones cada 75 horas de uso, donde se evaluará el estado del camión Komatsu 930E y se realizarán las mediciones y llenado de los sistemas de reserva, de esta manera el tiempo de mantenimiento programado podrá disminuir a 7 horas. Con este cambio la distribución de tiempos varió al siguiente cuadro (ver Table 4).

El resultado de este cambio se reflejó en el Tiempo No Disponible del equipo debido a que disminuyó en 45%. El promedio de Tiempo No Disponible mensual era de 5.5 horas y ahora es de 2.85 horas.

Adicionalmente, la variación del tiempo entre cada inspección varió el Tiempo de Demoras No Programadas de 2.5 a 1.7 horas disminuyendo en un 35%.

La evaluación de un sistema de mantenimiento predictivo dio como resultado lo presentado en la Tabla 5.

TABLE V

INDICADORES DE GESTIÓN CON UN SISTEMA DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO

Indicadores		2019
Disponibilidad	Esperado	95%
	Prom. Actual	87.85%
Utilización Efectiva	Esperado	95%
	Prom. Actual	86.9%
Calidad	Actual	95%

V. DISCUSIONES

A. Nuevos escenarios vs Resultados

El desarrollo del presente trabajo y los resultados obtenidos cumplieron con los objetivos específicos planteados. Entre ellos, se encuentran el cálculo de las demoras operativas programadas y no programadas que sumaron un total de 830 horas anuales, así como también se planteó los posibles objetivos de mejora centrándose en la evaluación del cambio del mantenimiento preventivo a predictivo. Este cambio permitiría a la unidad minera un promedio de mejora del 2% anual de sus indicadores de gestión, mejorando notablemente el tiempo disponible de los camiones Komatsu 930E y aumentando su porcentaje mensual de utilización efectiva a 86% aproximadamente

En relación con el nivel de precisión obtenido por el prototipo Rapid Miner creado por Bastos [7], la metodología aplicada en su trabajo de investigación generó un 71.3% de precisión debido a que el análisis de los datos dispersos en tiempo real se realizaba sin contrastar con una base de datos de reporte de fallas, es decir que los resultados no eran confiables. Sin embargo, en este trabajo de investigación se realizó el análisis de los datos del Dispatch en conjunto con el reporte de fallas y demoras operativas lo que generó un nivel de precisión del 92% aproximadamente.

Este trabajo de investigación puede ser respaldado por Sipos [8], donde indica que es necesario contar con una base de datos que pueda representar la variación de las variables operativas, así como un mensaje que describa el evento, en este caso las demoras operativas. El estudio presentado por este autor estaba enfocado en técnicas de aprendizaje automático y en base de datos de menor cantidad. La diferencia es que las técnicas de aprendizaje automático realizado por el sistema de gestión de flotas es confiable debido a la cantidad de datos que son almacenados en el sistema.

Respecto a la reducción de las demoras operativas, los resultados se aproximan a los obtenidos por Champi [9]

quienes se enfocaron en disminuir los tiempos de abastecimiento, así como optimizar el tiempo de cambio de guardia. La diferencia radica en que la unidad minera establece un tiempo máximo de abastecimiento de 3 horas mensuales para disminuir los tiempos ocasionados por las demoras programadas.

A diferencia de la investigación planteada por Rezig [6] donde determina los patrones secuenciales de las actividades de mantenimiento utilizando la mineral de datos, usa como principal variable la cantidad y tiempo de cambio de repuestos en cada equipo, sin embargo, solo logró una efectividad del 55%. Para el presente trabajo de investigación se utilizó la información de los repuestos sin embargo no se consideró como una variable determinante debido a que, en la unidad minera, se estaba intentando disminuir el uso de repuestos en cada parada de mantenimiento debido al sobre costo que generaba.

Para poder aumentar las horas efectivas del camión Komatsu 930E de 5.5 horas a 6.9, la investigación realizada por Gaimes [10] se base en el incremento de la producción diaria con equipos nuevos y en implementar un plan de mantenimiento a las 10,000 horas de uso del equipo mientras que la investigación realizada se basa en realizar mantenimientos predictivos a las 500 horas con inspecciones a las 75 horas para aumentar en promedio las horas efectivas de 13.2 a 16.1.

B. Análisis de Resultados

Se obtuvo 3 resultados con respecto a la evaluación de un sistema de mantenimiento predictivo para los camiones Komatsu 930E. En primer lugar, se logró disminuir las demoras operativas no programadas en un 35%. Además, las horas utilizadas por el equipo incrementó de 13.4 a 16.6 horas por día. Finalmente, el porcentaje de utilización efectiva cambió de 78% aproximadamente a 86% como promedio anual.

TABLE IV
DISTRIBUCIÓN DE TIEMPOS CON SISTEMA DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO

Mes	Nº días	T. Disp (hrs diarias)	T. No Disp. (hrs diarias)	T. Operativo (hrs diarias)	T. Dem. Prog (hrs diarias)	T. Dem. No Prog. (hrs diarias)	T. Util. (hrs diarias)
Enero	31	21.1356	2.8644	19.1356	0.87	1.5847	16.6809
Febrero	28	21.0036	2.9964	19.0036	0.96	1.61915	16.42445
Marzo	31	20.8056	3.1944	18.8056	0.84	1.60095	16.36465
Abril	30	21.558	2.442	19.558	0.88	1.8018	16.8762
Mayo	31	20.6736	3.3264	18.6736	0.88	1.5119	16.2817
Junio	30	21.0168	2.9832	19.0168	0.93	1.4748	16.61195
Julio	31	21.1884	2.8116	19.1884	0.86	1.5379	16.7405
Agosto	31	21.6372	2.3628	19.6372	0.89	1.7576	16.9896
Setiembre	30	21.8352	2.1648	19.8352	0.9	1.77515	17.16005
Octubre	31	20.6076	3.3924	18.6076	0.89	1.4794	16.2382
Noviembre	30	20.85785	3.14215	18.85785	0.88	1.52425	16.4536
Diciembre	31	20.6868	3.3132	18.8868	0.93	1.49305	16.26375

C. Trabajos Futuros

Para investigaciones realizadas posterior a este estudio, se recomienda utilizar una base de datos con información tomada en el campo para verificar que el almacenamiento de datos en el sistema de gestión de flotas se realiza de forma correcta.

VI. CONCLUSIONES

En conclusion el estudio logró identificar las principales demoras operativas programadas y no programadas en la unidad minera y proponer como posible sugerencia un cambio en el sistema de mantenimiento a un mantenimiento predictivo.

Se concluye que la evaluación de un sistema de mantenimiento predictivo generó mejores resultados en la reducción de las horas de demoras operativas no programadas, representando una disminución del 35%.

Además, tras el análisis de la distribución de tiempos se pudo obtener una mejora significativa en las horas utilizadas por el camión Komatsu 930E de 13.48 a 16.87 horas por día al igual que las horas disponibles que cambiaron de 17.92 a 20.36 horas por día

Finalmente, es necesario identificar el sistema de mantenimiento adecuado para cada tipo de equipo dentro de la operación minera, en el ciclo de acarreo el desgaste de los equipos es mayor, sin embargo, realizar mantenimiento continuo puede generar impactos negativos en el rendimiento del equipo.

REFERENCIAS

- [1] Liu, S. Q., & Kozan, E. (2016). New graph-based algorithms to efficiently solve large scale open pit mining optimisation problems. *Expert Systems with Applications*, 43(Suppl C), 59–65.
- [2] Moradi Afrapoli, A., Tabesh, M., & Askari-Nasab, H. (2019). A multiple objective transportation problem approach to dynamic truck dispatching in surface mines. *European Journal of Operational Research*, 276(1), 331–342.
- [3] Moradi Afrapoli, A., & Askari-Nasab, H. (2017). Mining fleet management systems: A review of models and algorithms. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 1–19.
- [4] Kruczek, P., Gomolla, N., Hebda-Sobkowicz, J., Michalak, A., Śliwiński, P., Wodecki, J., ... Zimroz, R. (2019). Predictive Maintenance of Mining Machines Using Advanced Data Analysis System Based on the Cloud Technology. In *Proceedings of the 27th International Symposium on Mine Planning and Equipment Selection - MPES 2018* (pp. 459–470).
- [5] Indrawati, Sri & Ridwansyah, Muhammad. (2015). Manufacturing Continuous Improvement Using Lean Six Sigma: An Iron Ores Industry Case Application. *Procedia Manufacturing*, 4, 528-534.
- [6] Rezig, S., Achour, Z., & Rezg, N. (2018). Using data mining methods for predicting sequential maintenance activities. *Applied Sciences (Switzerland)*, 8(11).
- [7] Bastos, P., Lopes, I., & Pires, L. (2014). Application of data mining in a maintenance system for failure prediction. In *Safety, Reliability and Risk Analysis: Beyond the Horizon - Proceedings of the European Safety and Reliability Conference, ESREL 2013* (pp. 933–940). shers..
- [8] Sipos, R. (2014). Log-based predictive maintenance. In *Proceedings of the 20th ACM SIGKDD international conference on Knowledge discovery and data mining (KDD '14)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 1867–1876.
- [9] Champi, M (2015). Reducción de las demoras operativas y optimización de tiempos por abastecimiento de combustible con el sistema vr - 300 gpm. En los volquetes de mina - unidad operativa cuajone (tesis de pregrado). Arequipa, Perú.
- [10] Gaimes, D. (2019). Optimización del ciclo de minado para incrementar la productividad diaria en la Cooperativa Minera Limadata Ltda. (tesis de pregrado). Arequipa, Perú.