

FACULTAD DE INGENIERÍA

Carrera de Ingeniería Industrial

“DISEÑO DE UN MODELO DE PROGRAMACIÓN DE MANTENIMIENTO USANDO SIMULACIÓN MONTECARLO PARA PRONOSTICAR LA DISPONIBILIDAD Y LUCRO CESANTE ASOCIADO A LA FLOTA DE PALAS EX5500 DE UNA EMPRESA MINERA”

Tesis para optar el título profesional de:

INGENIERO INDUSTRIAL

Autores:

Bach. Sharon Lizeth Castillo Bazán

Bach. Dennis Renato Perez Villena

Asesor:

MBA. Ing. Mylena Karen Vilchez Torres

Cajamarca - Perú

2021



DEDICATORIA

Dedicado a nuestros amados padres, hermanos
y familia en general

AGRADECIMIENTO

A Dios, primeramente.
Familia, amigos y docentes de la universidad
que nos ayudaron a que esta investigación sea posible.

Tabla de contenidos

DEDICATORIA	2
AGRADECIMIENTO.....	3
ÍNDICE DE TABLAS	5
ÍNDICE DE FIGURAS	6
ÍNDICE DE ECUACIONES	7
RESUMEN	8
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN	9
CAPÍTULO II. MÉTODO.....	11
2.1 Clasificación de la investigación	11
2.2 Operacionalización de variables	19
2.3 Técnicas e instrumentos para la recolección de datos.....	21
2.4 Técnicas de procesamiento y análisis de datos	21
2.5 Aspectos ético	21
CAPÍTULO III. RESULTADOS	23
3.1 Diagnóstico de la información actual del programa de mantenimiento	23
3.2 Diseño del modelo mediante simulación montecarlo	29
3.2.3 Validación	40
3.3 Análisis de resultados	41
CAPÍTULO IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES.....	43
4.1 Discusión.....	43
4.2 Conclusión.....	44
REFERENCIAS	46
ANEXOS	46

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla N°1: Tiempo de movimiento de la pala	14
Tabla N°2: Diseño Base	16
Tabla N°3: Variable Exogena	19
Tabla N°4: Variable Endogena	20
Tabla N°5: Técnicas, instrumentos y procedimientos de recolección de datos	21
Tabla N°6: Tiempo en que la máquina se encuentra inoperativa	22
Tabla N°7: Tiempo en que la máquina está operativa	22
Tabla N°8: Tiempo medio para reparar la flota de palas EX5500	23
Tabla N°9: Tiempo entre fallos de la flota de palas EX5500	23
Tabla N°10: Tiempo de parada de máquina	24
Tabla N°11: Disponibilidad de la flota de palas EX5500	25
Tabla N°12: Conversión de factor	26
Tabla N°13: Conversión de factor K	26
Tabla N°14: Conversión de factor E	26
Tabla N°15: Densidad	27
Tabla N°16: Familia de servicios por código	28
Tabla N°17: Familia de servicios por acción	29
Tabla N°18: Familia de servicios por acción	31
Tabla N°19: Frecuencia de servicios	32
Tabla N°20: Frecuencia de fallos de las palas	32
Tabla N°21: Prueba #1 simulación	33
Tabla N°22: Prueba #2 simulación	34
Tabla N°23: Prueba #3 simulación	35
Tabla N°24: Prueba #4	36
Tabla N°25: Prueba final	37
Tabla N°26: Tabla del error pronóstico	38
Tabla N°27: Tabla del error cuadrático medio	38
Tabla N°28: Tabla comparativa de resultados	39

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura N°1: Tiempo medio para reparar de la flota de palas EX5500_____	23
Figura N°2: Tiempo medio entre fallos de la flota de palas EX5500_____	24
Figura N°3: Tiempo de parada de máquina_____	24
Figura N°4: Disponibilidad de la flota de palas EX5500_____	25

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1	13
Ecuación 2	13
Ecuación 3	13
Ecuación 4	14
Ecuación 5	15
Ecuación 6	15
Ecuación 7	15
Ecuación 8	16
Ecuación 9	16
Ecuación 10	18
Ecuación 11	18

RESUMEN

En las grandes minas, las palas hidráulicas EX5500, son equipos fundamentales debido al alto costo de capital, es por ello que es fundamental tener un buen programa de mantenimiento, la disponibilidad de estos equipos depende del correcto diseño del programa, utilizando herramientas adecuadas para garantizar la disponibilidad y la menor pérdida en lucro cesante. En esta investigación se diseñó un modelo de programa de mantenimiento usando Simulación Montecarlo para pronosticar la demanda y lucro cesante. Además, este nuevo diseño ayudó a poder pronosticar otros aspectos importantes dentro del mantenimiento, como es: tipo de servicios, número de pala, tiempo de reparación, entre otros posibles. El resultado más sobresaliente fue la elaboración eficaz del diseño del programa de mantenimiento mediante Simulación Montecarlo, y este logro pronosticar de una mejor manera la disponibilidad, así como también el lucro cesante de la empresa minera. Un aspecto importante es la validación de este diseño de programa de mantenimiento por medio del cálculo de un error cuadrático, siendo este 3.97%.

Palabras clave: Palas hidráulicas, Simulación Montecarlo, pronóstico

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

Las grandes minas a cielo abierto, donde el número y el tamaño de los activos en operación son a menudo alta, pronosticar la disponibilidad de los equipos es un paso fundamental en cualquier proceso de gestión. Esta capacidad ayuda a predecir los costos de mantenimiento y las acciones necesarias para garantizar la fiabilidad de los activos (Silva, Viana, y Queiroz 2016).

Es por ello que se decidió realizar la presente investigación en el programa de mantenimiento de las palas EX5500 en el sector minero, en la ciudad de Cajamarca, puesto que la inactividad en este sector representa no solo un gran aumento en el lucro cesante, sino también, una falta de disponibilidad en las palas, debido a una mala programación y un mal manejo del programa de mantenimiento, entonces ¿Cómo debería ser el diseño de un modelo de programación de mantenimiento usando simulación montecarlo para que permita pronosticar la disponibilidad y lucro cesante asociado a la flota de palas EX5500 en una empresa del sector minero?

La indisponibilidad de los sistemas genera costos de ineficiencia por no producción o por falta de servicio. En algunos sistemas industriales los costos de ineficiencia son tan elevados que podría ser económicamente conveniente considerar equipos de respaldo para lograr la disponibilidad y nivel de servicio necesario (Viveros et al. 2013). En toda actividad industrial, el papel del mantenimiento es crucial. Decisiones sobre los correctos métodos a aplicar en mantenimiento, las mejores técnicas a utilizar y dependen cada vez más de la calidad tecnológica de las actividades de mantenimiento (Silva et al., 2016). Entre los equipos / maquinaria que requieren estrategias y análisis específicos debido a su alto costo de capital a gran escala y al impacto en las actividades de extracción de minerales, se encuentran las excavadoras hidráulicas (Vílchez Torres et al., 2020). El lucro cesante por hora de una pala hidráulica EX5500 es muy elevado, porque al producirse una

falla en el equipo, no solo ocasiona pérdidas en esa área, sino también en áreas complementarias, retrasando de esa manera, la producción. La disponibilidad sigue siendo el indicador por excelencia, que permite al área de mantenimiento enfocar sus esfuerzos en mantener los equipos en operación la mayor parte del tiempo posible, y para el área de operaciones, la disponibilidad de los equipos contribuye significativamente en alcanzar las metas de producción, pero, mantener control sobre el total de variables que determinan la disponibilidad de los equipos en minería a gran escala es complejo (Vílchez Torres et al. 2020). Se determinó utilizar esta herramienta, puesto que ayudara a diseñar un programa de mantenimiento efectivo y permitiera pronosticar la disponibilidad y lucro cesante de la empresa minera. La simulación no es una técnica de optimización. Más bien se usa para estimar las mediciones del desempeño de un sistema modelado.

Un precursor de la simulación actual es el experimento Montecarlo, un esquema de modelado que estima parámetros estocásticos o determinísticos con base en un muestreo aleatorio (Taha 2012).

El pronóstico de disponibilidad permite anticipar las acciones correctivas necesarias al tiempo que brinda información estratégica al cliente sobre el uso de la flota durante producción. El pronóstico de disponibilidad es un paso clave en el proceso de gestión de mantenimiento, por el cual se anticipan los costos y se pueden tomar acciones para mantener y mejorar la fiabilidad de la flota (Silva et al. 2016). En este aspecto ayudará la simulación montecarlo, ya que se podrá identificar correctamente el tipo de mantenimiento a realizar en la maquinaria mencionada. Para esto se identificó los principales puntos críticos, para luego diseñar el modelo de acuerdo a las necesidades de la empresa que ayude a pronosticar la disponibilidad y el lucro cesante de la flota de palas EX5500.

Para determinar ello, el objetivo principal propuesto para esta investigación es diseñar un modelo de programa de mantenimiento, usando simulación montecarlo para

pronosticar la disponibilidad y lucro cesante, para ello se realiza un diagnóstico de la información actual del programa de mantenimiento; con la información se diseña mediante simulación Montecarlo el programa de mantenimiento, finalmente se analiza la efectividad del nuevo programa de mantenimiento sobre la disponibilidad y lucro cesante. Al tratarse de una investigación predictiva no se valida mediante contrastación de hipótesis dado que se trata de un pronóstico, la validación del pronóstico se hace en función del error cuadrático del pronóstico.

CAPÍTULO II. MÉTODO

2.1 Clasificación de la investigación

Según su enfoque

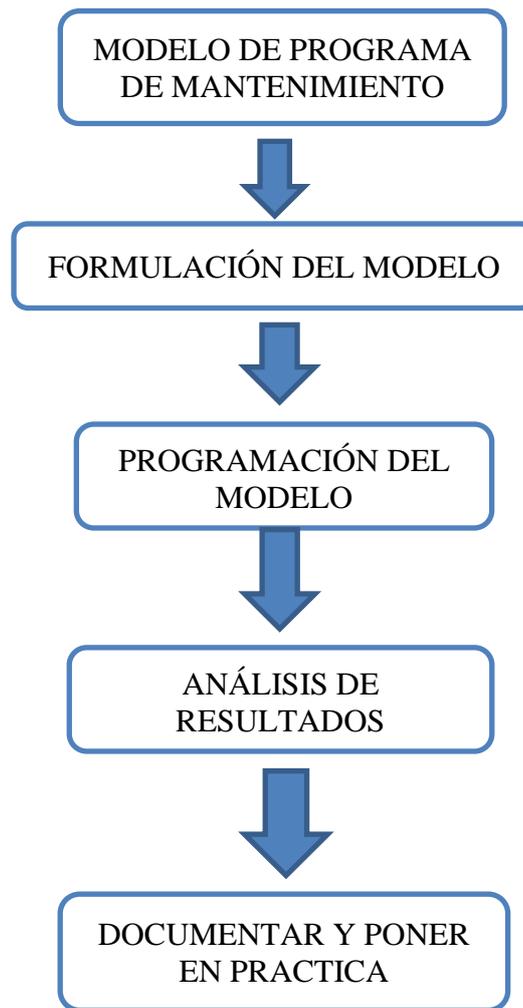
Cuantitativo: es un método de investigación que utiliza herramientas de análisis matemáticos y estadísticos para describir, explicar y predecir fenómenos mediante datos numéricos.

Según su nivel o alcance

Predictivo: porque su propósito es prever o anticipar situaciones futuras, a partir de estudios exhaustivos y del estudio de las probabilidades de algunos de esos eventos.

Según su diseño

Al ser predictiva esta investigación utilizó modelamientos que regulen el diseño, el cual se detalla a continuación



Donde:

Formulación del modelo: diagnostico de la información actual del programa de mantenimiento.

Programación del modelo: diseño mediante simulación Montecarlo del programa de mantenimiento.

Análisis de resultados: analizar la efectividad del nuevo programa de mantenimiento.

Formulación del diseño

Para el diagnostico de la empresa se realizo un procesamiento de la data, identificando los principales indicadores de disponibilidad y lucro cesante, para ellos se

seleccionó 4 meses para empezar el diseño del pronostico y dos meses mas para obtener dichos indicadores.

Disponibilidad: probabilidad que un sistema, aparato o dispositivo cumpla con una determinada funcion bajo ciertas condiciones durante un tiempo determinado

(Escudero,2016). Para este estudio se uso la ecuacion 1

$$A_i = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \times 100\% \quad (1)$$

Donde:

A_i: disponibilidad

MTBF: Tiempo medio entre fallas

MTTR: Tiempo medio para repara

MTBF: tiempo promedio que un equipo, máquina, línea o planta cumple su función sin interrupciones debido a fallas funcionales (Escudero,2016). Para el estudio se uso la ecuacion 2

$$\left(\frac{\text{Tiempo total de func}}{\text{Nº de fallas}} \right) \times 100\% \quad (2)$$

Donde:

Tiempo total de funcionamiento: tiempo que la maquina esta operativa

N de fallas: numero de veces que falla la pala

MTTR: tiempo promedio para restaurar la función de un equipo, máquina, linea planta o proceso despues de una falla funcional (Escudero,2016). Para este estudio se uso la ecuacion 3

$$\left(\frac{\text{Tiempo total de inac.}}{\text{Nº de fallas}} \right) \times 100\% \quad (3)$$

Donde:

Tiempo total de inactividad: tiempo que la maquina esta inoperativa

N de fallas: numero de veces que falla la pala

Tiempo de parada de máquina: Una parada de maquina de mantenimiento, es un período durante el cual la maquina se encuentra fuera de servicio (Quintero, 2020). Para este estudio se uso la ecuacion 4

$$\left(\frac{\text{Tiempo de parada}}{\text{Horas de Trabajo}} \right) \times 100\% \quad (4)$$

Donde:

Tiempo de parada: el tiempo en el que la maquina se encuentra detenida.

Horas de trabajo: las horas que la maquina trabaja.

Lucro cesante: Es la perdida de la utilidad económica por parte de la empresa a causa de eventos negativos. Al planificar proyectos de movimiento de tierras, una cuestión muy importante es cómo calcular la producción de las máquinas. El primer paso al estimar la producción es calcular un valor teórico como se explica a continuación. Este valor teórico es entonces ajustado de acuerdo con las cifras reales obtenidas de experiencias anteriores en operaciones similares. (Handbook Komatsu 30, 2009). Para obtener una comparación económica, se requiere conocer los tiempos de carga y descarga de la maquinaria, así como también información del manual de rendimiento de maquinaria pesada, con estos datos se puede calcular el lucro cesante.

Tabla N°1 Tiempo de movimiento de la pala

Tiempo	Segundos
Excavación	20
Giro (con carga)	7
Descarga	3.5
Retorno (sin carga)	8
Posicionamiento	6
Total	44.5

Con la ayuda de esta tabla se calcula el tiempo del ciclo. Para este estudio se uso la ecuacion 5

$$C_m = (\text{tiempo de conversion}) \times (\text{factor de conversion}) \quad (5)$$

Donde:

C_m: Tiempo de ciclo

Tiempo de conversion: total del tiempo de movimiento de la pala

X(factor de conversion): condicion de excavacion / la relacion de profundidad de carga

Factor de conversión. Condición de excavación 5m / 6 m Relación de profundidad de carga de la pala con la profundidad máxima. (5/6 = 0.83, corresponde un valor de conversión de 1.5)

Se calculo la producción por ciclo y para este estudio se uso la siguiente ecuacion:

$$q = (q^1)x(k) \quad (6)$$

Donde:

q: produccion por ciclo: m³ o yd³

q¹: capacidad del cucharon: m³ o yd³

K: Factor de llenado del cucharon

k (Factor de llenado del cucharón). Para una producción de excavación normal, tenemos un factor de 0.9.

Se calculó la producción horaria de la pala y para este estudio se uso la siguiente ecuacion:

$$Q = (q) \times \frac{3600}{C_m} \times (E) \quad (7)$$

Donde:

Q: produccion horaria de la pala: m³/h ó yd³/h

q: produccion por ciclo

C_m: tiempo de ciclo: seg

E: condicion de operacion

E (Condición de operación). Para una condición normal se usa 0.75

Se calculó el peso que mueve la pala por hora usando la siguiente ecuacion:

$$\partial = \frac{m}{v} \quad (8)$$

Donde:

∂ : densidad de material: kg/m³

m: peso que mueve la pala por hora: gr

v: produccion horaria de pala: m³

Para obtener las oz/hr, primero se convierte la masa a gr/hr, mediante la multiplicación del resultado anterior por la ley de gramos promedio de 2.01 gramos por tonelada y una ozT equivalente a 31.103, obteniendo la nueva masa para hallar la cantidad de oro/hora

Con este conocimiento se calculo el lucro cesante por hora utilizando la siguiente formula:

$$\text{Generación/hora} = (\text{onza troy}) \times \left(\frac{\text{Costo}}{\text{onza troy}} \right) \quad (9)$$

Donde:

Generacion/hora: dinero en bruto que genera la pala por hora

Onza troy: cantidad de oro por hora

Costo: costo de la onza troy

Una vez obtenidos estos indicadores se procede a elaborar una formulación del modelo identificando los atributos, los cuales son las propiedades que poseen los componentes del sistema usando excel

Tabla N°2: Diseño base

Iteración	Pala	Tipo de mantenimiento	Servicios
-----------	------	-----------------------	-----------

Fuente: elaboracion propia

Donde:

Iteración: el número de corridas que se realiza en el diseño

Pala: identificación de la pala para el estudio de 1 a 4 palas

Tipo de mantenimiento: preventivo o correctivo

Servicio: familia de servicios y tipo de servicios según el fallo

Programación del modelo

Para el diseño se utilizó Simulación Montecarlo, esta herramienta permitio generar un programa de mantenimiento más específico en el que no solo se conozcan los tipos de reparaciones si no que identifique el tipo de mantenimiento (preventivo o correctivo) de cada una de las 4 palas; para esto se siguió los pasos

- Clasificar y agrupar la data
- Construcción del modelo de mantenimiento
- Validar el modelo

Clasificar y agrupar la data

Luego de obtener la data necesaria se indentifico y clasifico por familias el tipo de reparación que presentan las 4 palas

Construcción del modelo de mantenimiento

Primero se hayo la tabla de frecuencias que nos permitirá calcular la probabilidad de falla de familia de servicios y número de pala, también la probabilidad mínima y la probabilidad máxima de cada frecuencia; luego se diseñó el modelo de programa de mantenimiento comenzando por una serie de pruebas a medida que se va mejorando y solventando las necesidades identificadas, llegando a obtener una prueba de simulación del modelo aceptable.

Validación

Los métodos de validación sirven para comparar los resultados de series temporales de datos reales con los resultados obtenidos de una simulación para el mismo lapso temporal. La forma más común de validar un modelo consiste en examinar gráficamente el ajuste de los resultados del modelo a los datos correspondientes para el mismo período (Magdiel Ablan et al. 2011). Según (Pinedo Chapa, Joely Mireilli., 2018) Para calcular el error de pronóstico de cada periodo se uso la siguiente ecuacion:

$$e_t = Y_t - Y'_t \quad (10)$$

Donde:

e_t : error del pronostico en el periodo t

Y_t : valor real en el periodo t

Y'_t : Valor del pronostico para el periodo t

Para este método cada error de pronóstico o residual se eleva al cuadrado, luego se suma y se divide entre el número de observaciones. Este método penaliza los errores grandes de pronósticos; ya que los errores se elevan al cuadrado y puede ser preferible a otro método que tiene errores pequeños (Pinedo Chapa, Joely Mireilli., 2018). Para este estudio se utilizo la siguiente ecuacuacion:

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (Y_t - Y'_t)^2 \quad (11)$$

Donde:

MSE: error cuadratico

Σ : Sumatoria del error del pronostico en el periodo t

Análisis de resultados

Una vez validado el modelo, se obtuvo los indicadores de disponibilidad y lucro cesante del diseño simulado con montecarlo, para poderse comparar con los indicadores de los datos reales de la empresa.

2.2 Operacionalización de variables

Variable exógena: Son los elementos que definen el comportamiento del pronostico (Supo, 2017). Para el diseño del modelo, significaría los items colocados en las columnas de modelación de la simulación, llamados atributos, y a su vez como parte de la respuesta de estas iteraciones aparecen las variables endógenas

Variable endógena: Variable que se quiere pronosticar (Supo, 2017) para el diseño del modelo sería la disponibilidad y el lucro cesante

Tabla N°3: Variable Exogena

Variable Exógena	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensión	Indicador
Modelado de programa usando simulación Montecarlo	La simulación Montecarlo es un esquema de modelado que estima parámetros estocásticos o determinísticos con base en un muestreo aleatorio (Taha, 2012)	Identificación de las propiedades que posee la simulación montecarlo "atributos"	Pala	Código de pala pronosticada
			Tipo de mantenimiento	Preventivo correctivo
			Servicios	Familia de servicios
				Tipo de servicios

Fuente: elaborado por los investigadores

Tabla N°4: Variable endógena

Variable Endógena	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensión	Indicador
Disponibilidad	Representa el porcentaje de tiempo durante el cual un equipo se encuentra apto para su uso y operatividad	Se toma en cuenta la sumatoria del tiempo de parada planificadas, no planificadas y fallas de los equipos	disponibilidad	$A_i = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \times 100\%$
			tiempo medio entre fallas (MTBF)	$\left(\frac{\text{Tiempo total de func.}}{N^\circ \text{ de fallas}}\right) \times 100\%$
			Tiempo medio para reparar (MTTR)	$\left(\frac{\text{Tiempo total de inac.}}{N^\circ \text{ de fallas}}\right) \times 100\%$
			Tiempo de parada de máquina	$\left(\frac{\text{Tiempo de parada}}{\text{Horas de Trabajo}}\right) \times 100\%$
Lucro cesante	El lucro cesante es la pérdida de la utilidad económica por parte de las empresas a causa de algun evento negativo.	Uso de formulas mediante procesos de conversión	lucro cesante por parada de máquina	$C_m = (\text{tiempo de conversion}) \times (\text{factor de conversion})$ $q = (q^1) \times (k)$ $Q = (q) \times \frac{3600}{C_m} \times (E)$ $d = \frac{PPI}{..}$ $\text{Generación/hora} = (\text{onza troy}) \times \left(\frac{\text{Costo}}{\text{onza troy}}\right)$

Fuente: elaborado por los investigadores

2.3 Técnicas e instrumentos para la recolección de datos

Las técnicas e instrumentos que serán empleados en esta investigación, para la recolección de datos, se muestra en la siguiente tabla

Tabla N°5: Técnicas, instrumentos y procedimientos de recolección de datos

TÉCNICA	JUSTIFICACIÓN	INSTRUMENTOS	VALIDEZ
Analisis documental	Permite obtener información de los fallos de equipo y parada de máquinas.	Fichas de registro obtenida por la empresa	Se valido la informacion por medio de la ingeniera Karen Vilchez Torres

Fuente: Elaborado por los investigadores

2.4 Técnicas de procesamiento y análisis de datos

Se obtuvo la información por parte de la empresa minera, la cual es la ficha de registro del programa de mantenimiento que se usa, para luego ser procesada y clasificada en microsoft excel para luego proceder con el diseño de la nueva programación de mantenimiento.

2.5 Aspectos éticos

La preocupación de aspectos éticos en esta investigación esta centrada en el uso de la data obtenida por parte de la empresa, ya que tiene alta confidencialidad por tratarse de datos importantes de la maquinaria y costos de la empresa

En la presente investigación se tuvo en cuenta los siguientes principios:

- Se respeto la privacidad y confidencialidad de toda la información, especialmente archivos que fueron brindados por la empresa.

- La información no puede ser utilizada sin la autorización para otros propositos, en especial para uso comercial y administrativo

CAPÍTULO III. RESULTADOS

3.1 Diagnóstico de la información actual del programa de mantenimiento

En la tabla N°6 se encontró la frecuencia con que se producen las fallas en días

Tabla N°6: Tiempo en que la máquina se encuentra inoperativa

Pala 1	(F)	Pala 2	(F)	Pala 3	(F)	Pala 4	(F)
7/01/19		7/01/19		7/01/19		7/01/19	
14/01/19	7	8/01/19	1	12/01/19	5	8/01/19	1
15/01/19	1	10/01/19	2	15/01/19	3	14/01/19	6
16/01/19	1	12/01/19	2	17/01/19	2	15/01/19	1
17/01/19	1	15/01/19	3	18/01/19	1	19/01/19	4
18/01/19	1	17/01/19	2	19/01/19	1	20/01/19	1
21/01/19	3	19/01/19	2	20/01/19	1	23/01/19	3
22/01/19	1	20/01/19	1	23/01/19	3	24/01/19	1
25/01/19	3	22/01/19	2	24/01/19	1	27/01/19	3
29/01/19	4	29/01/19	7	25/01/19	1	29/01/19	2
30/01/19	1	1/02/19	3	26/01/19	1	2/02/19	4
2/02/19	3	2/02/19	1	27/01/19	1		
		3/02/19	1	29/01/19	2		
				30/01/19	1		
				1/02/19	2		
				2/02/19	1		

Fuente: elaborado por los investigadores

En la tabla N°7 se encontró el tiempo en que las palas estuvieron en actividad

Tabla N°7: Tiempo en que la máquina está operativa

Pala 1	Días	Pala 2	Días	Pala 3	Días	Pala 4	Días
14/01/19		12/01/19		10/01/19		7/01/19	
15/01/19	1	16/01/19	4	25/01/19	15	15/01/19	8
22/01/19	7	17/01/19	1	31/01/19	6	29/01/19	14
29/01/19	7	10/02/19	24	1/02/19	1	31/01/19	2
8/02/19	10			4/02/19	1		

Fuente: elaborado por los investigadores

Con ayuda de la tabla N°7 se obtiene el indicador tiempo medio para reparar (MTTR) el cual debe ser el mas mínimo posible para que la máquina este en óptimo estado, estos datos son reemplazados en la ecuación 3

Tabla N°8: Tiempo medio para repara de la flota de palas EX5500

(MTTR) Tiempo medio para reparar de la flota de palas hidraulicas con 4 equipos (Hrs)					
Fecha	Pala 1	Pala 2	Pala 3	Pala 4	MTTR
Ene	6.99	4.02	17.61	8.08	36.7
Feb	1.5	2.92	1.46	2.9	8.78

Fuente: elaborado por los investigadores

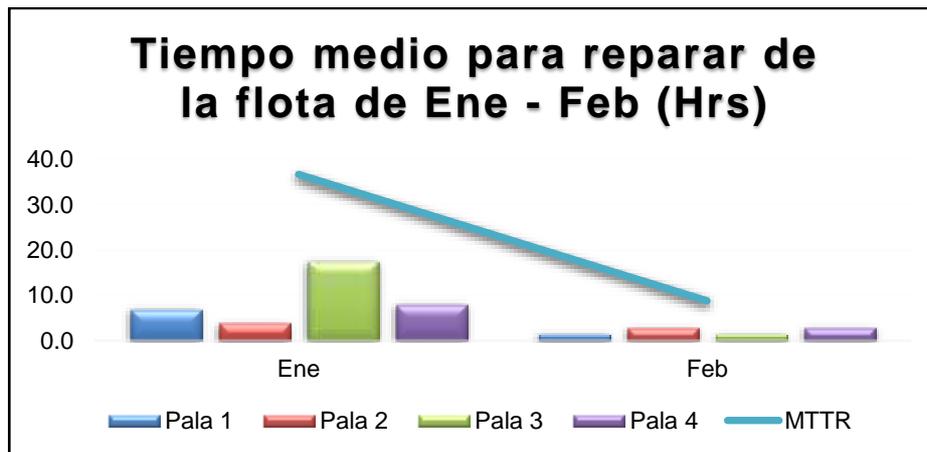


Figura N°1: Tiempo medio para reparar de la flota de palas EX5500

Con ayuda de la Tabla N°8 se obtuvo el primer indicador que es tiempo medio entre fallos (MTBF) el cual, mientras más alto sea, es más confiable el producto, estos datos fueron reemplazados en la ecuación 2

Tabla N°9: Tiempo medio entre fallos de la flota de palas EX5500

(MTBF) Tiempo medio entre fallos de la flota de palas hidraulicas con 4 equipos (Hrs)					
Fecha	Pala 1	Pala 2	Pala 3	Pala 4	MTBF
Ene	92.2	62.16	120.56	126.22	401.14
Feb	12	44	22	22	100

Fuente: elaborado por los investigadores

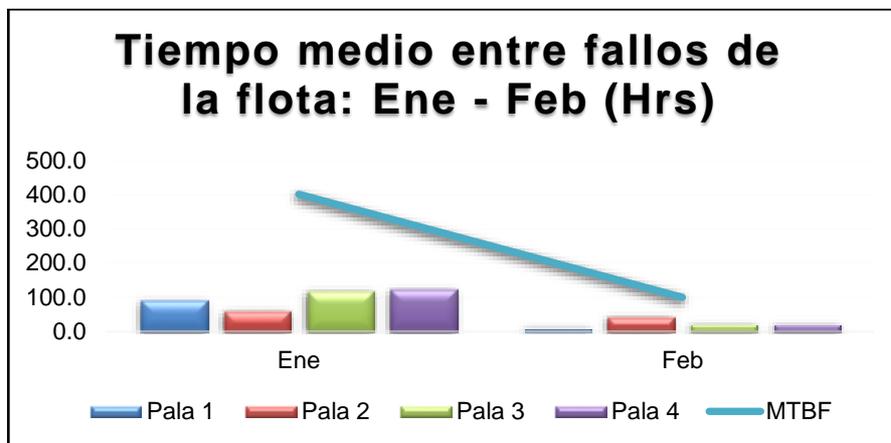


Figura N°2: Tiempo medio entre fallos de la flota de palas EX5500

También con las Tablas N°7 y 8 se obtiene el indicador tiempo de parada de máquina estos datos son reemplazados en la ecuación 4. Se puede apreciar que el menor porcentaje fue en el mes de febrero por lo que hubo una reducción en las paradas.

Tabla N°10: Tiempo de parada de máquina

Tiempo de parada de máquina (Días)					
Fecha	Pala 1	Pala 2	Pala 3	Pala 4	Promedio
Ene	8%	6%	15%	6%	9%
Feb	13%	7%	7%	13%	10%

Fuente: elaborado por los investigadores

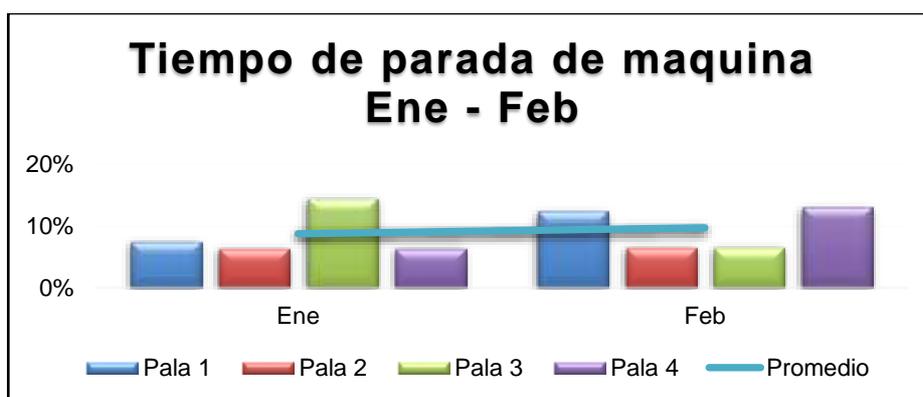


Figura N°3: Tiempo de parada de máquina

Para obtener el último indicador: **disponibilidad**, se utilizó la ecuación 1, el cual considera la relación de dos indicadores ya obtenidos anteriormente; MTBF (Tabla N°10) y MTTR (Tabla N°9). En la cual se utilizan los límites de control del 75% y 95%

indicadores de disponibilidad mínima y máxima, recomendado para operaciones en minera.

Tabla N°11: Disponibilidad de la flota de palas EX5500

Disponibilidad Mecánica de la flota de palas hidráulicas							
Fecha	Pala 1	Pala 2	Pala 3	Pala 4	Disp.	DispMin	DispMax
Ene	93%	94%	87%	94%	92%	75%	95%
Feb	89%	94%	94%	88%	92%	75%	95%

Fuente: elaborado por los investigadores

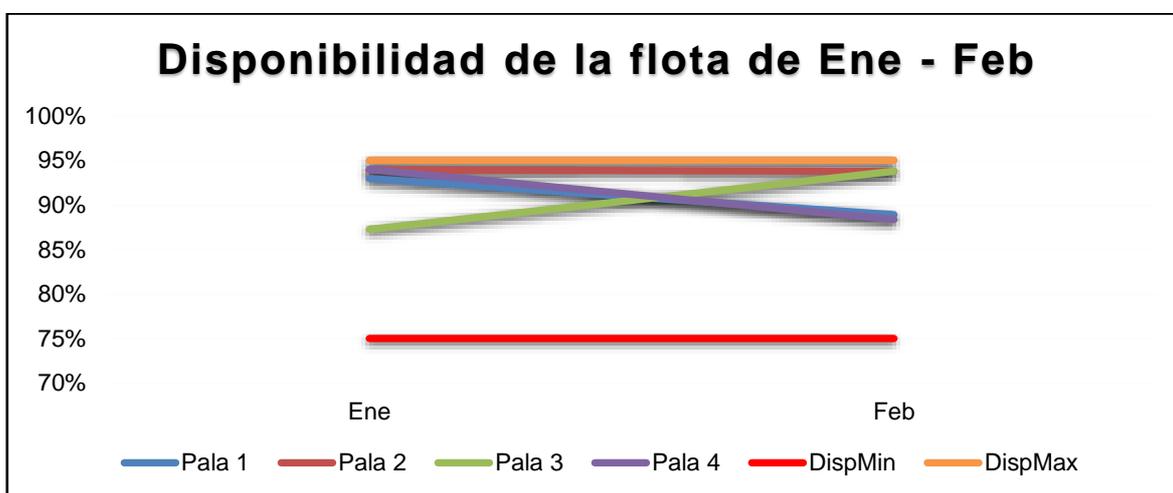


Figura N°4: disponibilidad de la flota de palas EX5500

Lucro cesante: Con los datos obtenidos del tiempo del movimiento de la pala (Tabla N°1) se puede calcular el tiempo del ciclo mediante la ecuación 5

- Calculó del tiempo de ciclo

$$C_m = (44.5s) \times (1.5)$$

$$C_m = 66.75 \text{ s}$$

Tabla N°12: Conversión de factor

Digging condition ($\frac{\text{Digging depth}}{\text{Specified max. digging depth}}$)	Dumping condition			
	Easy (Dump onto spoil pile)	Normal (Large dump target)	Rather difficult (Small dump target)	Difficult (Small dump target requiring maximum dumping reach)
Below 40%	0.7	0.9	1.1	1.4
40 ~ 75%	0.8	1	1.3	1.6
Over 75%	0.9	1.1	1.5	1.8

Fuente: (SPECIFICATIONS & APPLICATION HANDBOOK Edition 30, s. f.)

- Cálculo de la producción por ciclo utilizando la ecuación 6

$$q = (35.5 \text{ yd}^3) \times (0.9)$$

$$q = 31.95 \text{ yd}^3$$

Tabla N°13: Conversión de factor K

Table 10 Bucket factor (Loading shovel)

Excavating Conditions		Bucket factor
Easy	Loading clayey soil, clay, or soft soil	1.0 ~ 1.1
Average	Loading loose soil with small diameter gravel	0.95 ~ 1.0
Rather difficult	Loading well blasted rock	0.90 ~ 0.95
Difficult	Loading poorly blasted rock	0.85 ~ 0.90

Fuente: (SPECIFICATIONS & APPLICATION HANDBOOK Edition 30, s. f.)

- Cálculo de la producción horaria de la pala usando la ecuación 7

$$Q = (31.95 \text{ yd}^3) \times \frac{3600}{66.75} \times (0.75)$$

$$Q = 1292.36 \text{ yd}^3/\text{hr}$$

Tabla N°14: Conversión de factor E

Operating conditins	Job efficiency
Good	0.83
Average	0.80
Rather poor	0.75
Poor	0.70

Fuente: (SPECIFICATIONS & APPLICATION HANDBOOK Edition 30, s. f.)

Conforme a los resultados, hallamos que la pala trabaja con alrededor de 1292.36 yd^3 (988.66 m^3) de material por hora.

- Cálculo del peso que mueve la pala por hora usando la ecuación 8

$$1570 \frac{kg}{m^3} = \frac{m}{988.6550562 m^3}$$

$$m = 1552196.2 \text{ kg/hr}$$

$$m = 1552196200 \text{ gr/hr}$$

La densidad para un banco suelto de material (25% roca, 75 % tierra), es de 1570 kg/m³

Tabla N°15: Densidad

PESO DE LOS MATERIALES	SUELTO		EN BANCO		FACTORES DE CARGA
	kg/m ³	lb/yd ³	kg/m ³	lb/yd ³	
Basalto	1960	3300	2970	5000	0,67
Bauxita, Caolín	1420	2400	1900	3200	0,75
Caliche	1250	2100	2260	3800	0,55
Camotila, mineral de uranio	1630	2750	2200	3700	0,74
Ceniza	580	950	860	1450	0,66
Arcilla — en su lecho natural	1980	2800	2020	3400	0,82
seca	1480	2500	1840	3100	0,81
mojada	1980	2800	2060	3500	0,80
Arcilla y grava — secas	1420	2400	1660	2800	0,85
mojadas	1540	2600	1840	3100	0,85
Carbón — antracita en bruto	1190	2000	1600	2700	0,74
lavada	1100	1850			0,74
ceniza, carbón bituminoso	530-650	900-1100	590-890	1000-1500	0,93
bituminoso en bruto	950	1600	1260	2150	0,74
lavado	830	1400			0,74
Roca descompuesta —					
75% roca, 25% tierra	1980	3300	2790	4700	0,70
50% roca, 50% tierra	1720	2900	2280	3850	0,75
25% roca, 75% tierra	1570	2650	1960	3300	0,80
Tierra — Apisonada y seca	1510	2550	1900	3200	0,80
Excavada y mojada	1600	2700	2020	3400	0,79
Marga	1250	2100	1540	2600	0,81

Fuente: (SPECIFICATIONS & APPLICATION HANDBOOK Edition 30, s. f.).

- Cálculo de la cantidad de oro por hora

$$Au = (3119.914362 \text{ gr/hr}) \times \frac{1 \text{ oz } T}{31.1 \text{ gr/hr}}$$

$$Au = 100.3091137 \frac{\text{oz } T}{\text{hr}}$$

Con el dato obtenido, se puede calcular el lucro cesante perdido por hora utilizando la ecuación 9

$$\frac{\text{Generación}}{\text{hora}} = 100.3091137 \text{ oz } T \times 1750.92 \text{ USD/oz}$$

$$\text{Generación/hora} = 175633.2333 \text{ USD/hr}$$

Se genera un lucro cesante de 175633.2333 dólares por hora, este costo se considera una pérdida por pala por hora no trabajada.

3.2 Diseño del modelo mediante simulacion montecarlo

3.2.2 Clasificar y agrupar la data

Se identifico las tres primeras por códigos que tiene la empresa como 'SH' (Sistema Hidraulico), 'Inspeccion', 'SE' (Sistema Electrico) (Tabla N°17) y las otras 7 por tener la misma acción como "Cambios", "Soldaduras", "Cortes" en la Tabla N° 18, "Fabricaciones", "Reparaciones", "Extracciones" y "Otros" en la Tabla N° 19 logrando obtener de esta manera 10 tipos de familias para la programación

Tabla N°16: familia de servicios por código

SH	INSPECCION	SE
SH Fisura o ruptura de o-ring de filtro strainer	INS Cintillos para Motor	SE inyec. por comdición 1 y 3 Mot.LH
SH Reparar Fisuras + Inst Pepas Pin ""G	INS Frasco- muestreo	SE aceite motor y caja RH X PM50
SH Barrenad aloj. Pin unión boom-mainfra	INS cbiar swict temperatura	SE aceite Mot. y Caj. P8, tomar mues
SH Barrenado aloj pin F-brazo (02)	INS inspe pines mediante termografia	SE cinturón de seguridad de asiento
SH Purgador suelto o flojo	INS Tomar muestra aceite Mot. y Caj. P6	SE aceite de TX bombas LH por cond.
SH Corte y soldeo de fitin de aceite hid	INS inspección NDT PRE PM	SE faros de pertigas por condición
SH Corte de guarda de plataf RH frontal	INS inspeccion aceite de transb bombas	SE aceites Transmisiones Giros P5
SH Reparar fisura parante cuarto de moto	INS inspeccion de manguera Hyd	SE de aceite motor LH caja Pala 7
SH Contaminacion de filtro de bomba	INS Inspección NDT PRE PM	SE pernos de cabina ope. por condici
SH END Aberturas de Man Hole + Fisuras e	INS inspeccion aceite tb bombas LH x condición	SE bomba auxili de motor por condic
SH Corte y Soldeo de abrazadera en brazo	INS Tomar muestra aceite Mot. y Caj. P7	SE aceites Trans. Giros y propel P8
SH Esmerilado de alojamientos RH	INS inspeccion cilindro de Dampi RH	SE Varilla de aceite motor LH P7
SH Reparacion de Abrazaderas Hidraulica	INS insp pines media termografia	SE Mang. de succión pilot.RH
SH Valbula deteriorada	INS inspeccion aceite de trans giro post RH	SE filtros de aire por condición P8
SH Esmerilado inst. cilindro dumping RH	INS Insp.arnes Hitachi x bajas RPM inter	SE abrazaderas para montaje de motor RH

SH Soldeo de abrazadera de tubería de Bo	INS inspeccion Sensor de acelerado cabina ope
SH Reparacion de fisura en cilindro de B	INS inspeccion filtros de aire por correct.
SH Colocar parche Boom LH	INS Inspeccion Válvulas de combustible
SH tubería floja o fuera de posición	INS ins aceite de trans- propel RH
SH Pulido de alojamiento de cadrich	INS inspeccion mtras de aceite giro delan- post
SH.Repacion tub.Entrega.Cil.Cucharon RH	INS inspe pines mediante termografia
SH Soldar Topes en Ruedas Guías	
SH Fisura de la manguera pasante por tunel LH	
SH Corte de topes en Rueda Guia RH-LH	
SH Soldeo en corona de giro	
SH Rep fisura en cil LH boom con mainfra	
SH Corte de pernos de bandeja de grasa d	
SH Corte de barras cilindro dumping	
SH Modificacion de base de radiador	
SH Soldeo de topes en motor de giro	
SH Reparacion de soportes de tuberías ae	
SH Soldeo de abrazaderas de cuerpo centr	
SH Soldeo de oreja en pin de cucharon LH	
SH Soldar fisura base de silenciador	
SH Esmerilado de retenes link RH, LH	
SH Soldeo de techo de cuarto de motor	
SH Reparacion de fisura cilindro boom LH	

Fuente: Elaborado por los investigadores

Tabla N°17: Familia de servicios por acción

CAMBIOS	SOLDADURAS	CORTES
Camb.mang.HYD.Motor Propel RH	Soldar pernos del cuerpo central de bomb	Cortar pernos de zapatas

Camiar mangueras lubricación Pta d brazo	Soldar pernos de pines de zapatas	Corte y reparacion de suples
cambio de sellos de manga enfriadores hy	Soldar barras aseguradora de pin	Cortar pernos de soporte de cabina
Camb.Mang.Cilindro.Cucharon LH	Soldar plataformas de transmisión LH RH	Cortar rótula de Cilindro
CAMBIO DE BATERAS	Soldar base de pértiga	Cortar y Soldar pernos de abrazadera en
CAMBIO DE ANTENA DE RADIO MUSICAL	Soldar topes de motor	Cortar buges en Punta de Brazo
CAMBIO DE CILINDRO DUMPING LH	Soldar Soporte de TK Refrigerante	
Cambio de manguera grasa	Soldar pértiga	
Camb Mang Entrega Strainer 7-8 V/C	Soldar topes en tapa del Pin en Punta Br	
CAMBIO DE BOMBA HIDRAULICA 1 Y 2	Soldar tapas de techo cuarto de motores	
Camb.tub.vertical.#8		
bloque.Sup.Mang.Boo		
Cambiar manguera ingreso microfiltrado		
Camb.Mang.Drenaje.Bombas.Princ.RH		
cambio de faros led		
CAMBIAR Y CARGAR SISTEMA CONTRA INCENDIOS		
Cambiar Seguro Pedal Traslado RH		
Cambio de sellos de mangueras Hidraulica		
Cambiar oring de Strainer 1 y 2		
Camb de mang piloto bombas Princ RH		
Camb.Mang.Entrega.Cil.Cucharon RH		
Cambiar válvulas sobrecarga levante boom		
Camb.Mang.Drenaje.Freno.Mot.Propulsion R		
CAMBIAR BOMBA DE ENGRASE		
Camb.Manguera.Entrega.Bomba Princ.		
Cambiar manguera cilindro de brazo		
Camb.Mang.Pin.Sup.Cil.Dumping LH		
Cambiar orings regulador bomba fan RH		
Cambiar culata #6R motor LH		
Cambiar Tumbler Derecho		
Cambiar manguera cilindro tensor RH		
Camb cañería grasa punta de brazo RH Est		
cambio de mangueras de punta de brazo		
Cambiar bujes cucharon por condición P8		
Cambiar rodillos superior		
Cambio pernos guarda de propulsion RH		
Cambiar Bomba de Grasa		
Camb.Mang.Drenaje Center Joint		
Camb.Mang.Piloto Valvulas Control		
Camb Mang.Sistema de traslado		

Cambiar Valvula CLS. (valvula verde)
 Camb.Sellos Tuberias.HyD
 Cambiar bomba de engrase
 cambio de claxon
 CAMB. VALV.SOLENOIDE CONTROL HYD
 Cambiar Rodillo Superior 2 y 3 LH
 Camb.Mang.HYD.Media Luna RH
 CAMBIO DE SEGUROS DE PINES
 Cambiar mangueras de lubricación
 cambio de mangueras de A/C
 cambio de maguera por fuga
 Camb.Mang.Entrega.Cil.Cucharon RH
 Cambio.Sellos.Regulador Bomb.Prin.
 Camb.Manguera.Dreanaje.Enfriadores.
 Camb.Sello.Une.Bomba.Fan y
 Bomba.Auxilia

Fuente: elaborado por los investigadores

Tabla N°18: Familia de servicios por acción

FABRICACIONES	REPARACIONES	EXTRACCIONES	OTROS
Fabricacion de tapones hidraulico	Reparar fisura de 380mm en Tapa (tope LH)	Extraer perno roto de abrasadera tuberia	Montaje de tapas pines de cucharón
Fabricar soporte de mangueras de Truck F	Reparar aire acondicionado	Extraer pernos rotos de brida de tubo de	Desmontaje de Carpa de Cucharón
Fabricar soportes para faros de trabajo	Reparar fisuras en cilindro de boom	Extraccion de perno roto de link RH	Desmontaje de manga de 8" de la pala 1
fabricar y soldar orejas en pin	Reparación de power stick		Desmontaje cuerpo de tuberías central
Fabricar tapas para lubricación en basti			

Fuente: elaborado por los investigadores

3.2.2 Construcción del modelo de mantenimiento

3.2.2.2 Tabla de frecuencias

Para realizar la construcción del modelo primero se obtiene la frecuencia con que se presentan los servicios (Tabla N°19) y la frecuencia con la que falla cada una de las palas (Tabla N°20), primero se organizó las familias de servicio y el número de la pala en que se da la falla, utilizando la fórmula “Contara” se logró conocer el número de la frecuencia en que estas fallas suceden, con la formula “Sumar” se puede saber

exactamente el número total de la suma de las frecuencias de estas fallas; con estos datos se calculó la probabilidad de falla de familia de servicios y número de pala, dividiendo la frecuencia de cada familia de servicio y número de pala entre el número total de frecuencias; finalmente, con los datos de probabilidad se pudo hallar la probabilidad mínima y la probabilidad máxima de cada frecuencia.

Tabla N°19: frecuencia de servicios

Familia de servicios	FRECUENCIA	PROBABILIDAD	PROB. MIN	PROB. MAX	FAMILIA
SH	37	0.23	0.00	0.23	SH
INSPECCION	21	0.13	0.23	0.36	INSPECCION
SE	15	0.09	0.36	0.46	SE
CAMBIOS	54	0.34	0.46	0.80	CAMBIOS
SOLDADURAS	10	0.06	0.80	0.86	SOLDADURAS
CORTES	6	0.04	0.86	0.90	CORTES
FABRICACIONES	5	0.03	0.90	0.93	FABRICACIONES
REPARACIONES	4	0.03	0.93	0.96	REPARACIONES
EXTRACCIONES	3	0.02	0.96	0.97	EXTRACCIONES
OTROS	4	0.03	0.97	1.00	OTROS
TOTAL	159				

Fuente: elaborado por los investigadores

Tabla N°20: Frecuencia de fallo de las palas

PALAS	FRECUENCIA	PROBABILIDAD	PROB. MINIM	PROB. MAX	FAMILIA
1	42	0.26	0.00	0.26	1
2	28	0.18	0.26	0.44	2
3	38	0.24	0.44	0.68	3
4	30	0.19	0.68	0.87	4
TOTAL	138				

Fuente: elaborado por los investigadores

3.2.2.2 Prueba #1

Se procede a realizar la prueba #1 de la simulación, donde se realizaron 133 iteraciones, utilizando la fórmula “aleatorio” se logró sacar números al azar con respecto a la pala en que se da el fallo, para luego utilizar la formula “BucarV” entre los números de probabilidad mínima y máxima de la tabla anterior; seguidamente se volvió a trabajar con números aleatorios, esta vez con respecto al número de mantenimiento, clasificando como mantenimiento preventivo “1” y correctivo “0”, finalmente se utilizó nuevamente número aleatorio, esta vez con respecto al tipo de servicio que tiene que ver con las familias de servicios, con estos números al azar se puede buscar entre las probabilidades mínima y máxima de los tipos de servicio con la formula “BuscarV” para obtener por medio de la simulación el tipo de servicio al que corresponde el número aleatorio.

BUSCARV(Aleatorio();matriz-tabla;indicador-columnas)

Tabla N°21: Prueba #1 simulación

iteración	aleatorio	pala	Aleatorio	tipo de mtto	Aleatorio	tipo de servicio
1	0.9689	4	0.433074163	1	0.938156191	REPARACIONES
2	0.9721	4	0.710032222	1	0.05791114	SH
3	0.7235	3	0.504005428	0	0.428452897	SE
4	0.6884	3	0.27675994	1	0.305551785	INSPECCION
5	0.7958	4	0.883400939	0	0.620495447	CAMBIOS
6	0.0557	1	0.547144451	0	0.0815385	SH
7	0.2101	1	0.229029731	1	0.673655045	CAMBIOS
8	0.9868	4	0.342363756	1	0.333335059	INSPECCION
9	0.6699	3	0.436136149	0	0.043572144	SH
10	0.0875	1	0.473272197	1	0.691375769	CAMBIOS
.						
.						
.						
132	0.8779	4	0.697907737	1	0.111709769	SH
133	0.8080	4	0.230012067	1	0.402574278	SE

Fuente: elaborado por los investigadores

Interpretación y conclusión: Con esta tabla se obtiene la primera prueba de simulación que ayudará a identificar con cuanta frecuencia se da el tipo de servicio, el tipo de mantenimiento y el número de pala donde la falla se produce.

3.2.2.6 Prueba #2

En la prueba #2, se cree conveniente agregar una columna a la derecha del tipo de mantenimiento, se utilizó la formula “Si” para poder dar una prueba lógica y condicionar si es que el número de la columna a la izquierda es 1, entonces se mostrará en el tipo de mantenimiento como preventivo, si el número es 0, entonces se mostrará el tipo de mantenimiento como correctivo.

SI(prueba lógica; valor verdadero; valor falso)

Tabla N°22: Prueba #2 simulación

iteracion	aleatorio	pala	tipo de mantenimiento	aleatorio	tipo de servicio
1	0.2952	2	1	0.86071404	SOLDADURAS
2	0.0994	1	0	0.99010591	OTROS
3	0.6232	3	1	0.29173944	INSPECCION
4	0.2097	1	0	0.6494043	CAMBIOS
5	0.1426	1	1	0.67436869	CAMBIOS
6	0.4684	3	1	0.76403355	CAMBIOS
7	0.4989	3	0	0.39324837	SE
8	0.2160	1	1	0.49781435	CAMBIOS
9	0.1150	1	1	0.12000029	SH
10	0.5437	3	0	0.14221012	SH
.					
.					
.					
132	0.9728	4	1	0.25334136	INSPECCION
133	0.3311	2	1	0.71813948	CAMBIOS

Fuente: elaborado por los investigadores

Interpretación y conclusión: Se concluye que, se consideró importante incluir esta columna, ya que, con ello se puede facilitar el análisis de la simulación.

3.2.2.6 Prueba #3

En la prueba #3, se procede a agregar una columna a la derecha de tipo de servicio, la cual identificará según la familia de servicio, el servicio que se hará en las palas; se usó la formula lógica “SI”, la cual tiene 3 partes: Una prueba lógica, un valor verdadero y un

valor falso; primero hallamos la formula lógica “INDICE” más “ALEATORIO.ENTRE”, con la ayuda de esta fórmula se pudo lograr un aleatorio de todas las familias de servicios que se halló como datos, se formuló de tal manera que el valor verdadero sea un dato aleatorio según el tipo de servicio; seguidamente el valor falso de la formula será una nueva fórmula “SI” para cada familia de servicios, para que, de esta manera, al algoritmo familia de servicio – tipo de servicio pueda funcionar correctamente.

SI(prueba lógica;(INDICE(matriz;ALEATORIO.ENTRE(Rango);columna));SI(.....

Tabla N°23: Prueba #3 simulación

iteracion	aleatorio	pa la	tipo de mantenimiento	aleatorio	tipo de servicio
1	0.550	3	0 Preventivo	0.1235	SH Barrenado aloj pin F-brazo (02)
2	0.093	3	1 Predictivo	0.3190	INSPECCI INS Inspeccion Sensor de acelerado cabina ope
3	0.010	5	1 Predictivo	0.9303	FABRICACI Fabricacion de tapones hidraulico
4	0.826	2	4 Predictivo	0.2863	INSPECCI INS Inspeccion filtros de aire por correct.
5	0.642	8	3 Preventivo	0.9306	FABRICACI Fabricar tapas para lubricación en basti
6	0.884	5	4 Predictivo	0.7597	CAMBIOS Cambiar culata #6R motor LH
7	0.301	4	2 Preventivo	0.8818	CORTES Cortar pernos de soporte de cabina
8	0.991	2	4 Predictivo	0.4088	SE abrazaderas para montaje de motor RH
9	0.045	3	1 Preventivo	0.8639	CORTES Cortar pernos de zapatas
10	0.086	7	1 Preventivo	0.2895	INSPECCI INS Inspeccion manguera Hyd
.
132	0.644	5	3 Preventivo	0.3279	INSPECCI INS Insp.arnes Hitachi x bajas RPM inter
133	0.773	0	4 Predictivo	0.3509	INSPECCI INS Sacar muestras de aceite giro delan- post

Fuente: elaborado por los investigadores

Interpretación y conclusión: La última columna de la derecha hace parte al tipo de servicio, siendo más específicamente el servicio exacto que se da en las palas, con esta columna se puede identificar cual es el fallo más común según el tipo de familia, consideramos que esta simulación ayudará más plenamente a cumplir con los objetivos que se espera.

3.2.2.6 Prueba #4

En la prueba #4 se agregó una columna extra a la derecha del tipo de servicio, esta columna es el MTTR (Tiempo medio de reparación), lo que nos dará como dato el tiempo en horas que se demora cada familia de servicio en promedio; para lograr este dato se utilizó la formula lógica “SI”; siendo la prueba lógica la celda de familia de servicios y según este dato el valor verdadero seria el tiempo mínimo y máximo en horas para ese tipo de servicio específico y el valor falso otra fórmula “SI” con el siguiente grupo de familias.

Tabla N°24: Prueba #4

iteracion	aleatorio	p	tipo de mantenimiento	aleatorio	tipo de servicio	MTTR
1	0.4273	2	0 Preventivo	0.14313539	SH	SH Esmerilado de alojamientos RH 11:03 - 18:24
2	0.5466	3	0 Preventivo	0.41394958	SE	SE aceite motor y caja RH X PM50 1:11 - 12:30
3	0.7308	4	1 Correctivo	0.50206079	CAMBIO S	cambio de sellos de manga enfriadores hy 1:46 - 22:00
4	0.9604	4	1 Correctivo	0.9354724	REPARACIONES	Reparar fisuras en cilindro de boom 6:21 - 22:50
5	0.1336	1	1 Correctivo	0.91529003	FABRICACIONES	Fabricar soportes para faros de trabajo 6:22 - 22:17
6	0.0880	1	0 Preventivo	0.26238586	INSPECCION	INS Inspeccion aceite de transb bombas 1:10 - 18:16
7	0.3097	2	1 Correctivo	0.42597031	SE	SE abrazaderas para montaje de motor RH 1:11 - 12:30
8	0.1687	1	0 Preventivo	0.14677883	SH	SH Soldeo en corona de giro 11:03 - 18:24
9	0.9718	4	1 Correctivo	0.83252924	SOLDAD URAS	Soldar plataformas de transmisión LH RH 1:30 - 13:00

						CAMBIAR Y CARGAR			
	0.67				0.636	CAMBIO	SISTEMA CONTRA	1:46 -	
10	26	3	1	Correctivo	38153	S	INCENDIOS	22:00	
	0.79			Preventiv	0.832	SOLDAD		1:30 -	
11	25	4	0	o	69151	URAS	Soldar pértiga	13:00	
	0.46				0.830	SOLDAD	Soldar plataformas de	1:30 -	
12	56	3	1	Correctivo	62677	URAS	transmisión LH RH	13:00	
	0.74				0.369		SE pernos de cabina ope.	1:11 -	
13	40	4	1	Correctivo	00461	SE	por condici	12:30	
	0.64				0.939	REPARA		6:21 -	
14	54	3	1	Correctivo	72272	CIONES	Reparación de power stick	22:50	
	0.64				0.046		SH Reparacion de fisura en	11:03 -	
15	27	3	1	Correctivo	69609	SH	cilindro de B	18:24	

Fuente: elaborado por los investigadores

Interpretación y conclusión: La última columna agregada nos muestra como resultado el MTTR, siendo este dato el tiempo con el que identificaremos las horas que se demora según el tipo de familia de servicio; Este es el mejor plan de mantenimiento para la empresa hasta este punto, ya que nos muestra el tiempo que tardará según el tipo de servicio que se dará en el mantenimiento de la empresa, sin embargo, puede mejorarse agregando niveles de disponibilidad, etc.

3.2.2.6 Prueba final

En esta prueba se asemejo la simulación a la data real con el mismo número de iteraciones por mes, se realizó esto para poder tener una mejor comparación de resultados a partir de la data real

Tabla N°25: Prueba final

Iteraci on	pal a	tipo de mantenimiento		tipo de servicio	MTTR
1	4	Correctivo	CAMBI OS	CAMBIAR Y CARGAR SISTEMA CONTRA INCENDIOS	1:46 - 22:00
2	2	Preventivo	CAMBI OS	Camb.Sellos Tuberias.HyD	1:46 - 22:00
3	4	Preventivo	CAMBI OS	Cambiar Bomba de Grasa	1:46 - 22:00
4	4	Preventivo	SE	SE Abrazaderas para montaje de motor RH	1:11 - 12:30

5	2	Preventivo	SE	SE bomba auxili de motor por condic	1:11 - 12:30
6	3	Correctivo	CAMBI OS	CAMBIO DE ANTENA DE RADIO MUSICAL	1:46 - 22:00
7	2	Preventivo	SE	SE de aceite motor LH caja Pala 7	1:11 - 12:30
8	3	Correctivo	CAMBI OS	Cambiar Bomba de Grasa	1:46 - 22:00
9	3	Preventivo	SH	SH extraccion de pernos	11:03 - 18:24
10	4	Preventivo	SE	SE de aceite motor LH caja Pala 7	1:11 - 12:30
11	4	Preventivo	CAMBI OS	Camb.Mang.Drenaje.Freno.Mot.Prop ulsion R	1:46 - 22:00
12	3	Preventivo	SE	SE aceite Mot. y Caj. P8, tomar mues	1:11 - 12:30
13	1	Correctivo	CAMBI OS	Camb.Mang.HYD.Media Luna RH	1:46 - 22:00
14	2	Preventivo	CAMBI OS	Camb.Sellos Tuberias.HyD	1:46 - 22:00
15	3	Correctivo	CAMBI OS	CAMBIO DE SEGUROS DE PINES	1:46 - 22:00
16	3	Preventivo	SH	SH Soldeo de oreja en pin de cucharon LH	11:03 - 18:24
17	4	Correctivo	CAMBI OS	Cambiar Bomba de Grasa	1:46 - 22:00
18	3	Preventivo	SH	SH Corte y soldeo de fitin de aceite hid	11:03 - 18:24
19	1	Preventivo	CAMBI OS	Camb.Mang.Piloto Valvulas Control	1:46 - 22:00
20	4	Correctivo	SH	SH Soldeo de techo de cuarto de motor	11:03 - 18:24
21	3	Preventivo	SE	SE Varilla de aceite motor LH P7	1:11 - 12:30
22	3	Preventivo	SH	SH Esmerilado ins. Cilindro dumping RH	11:03 - 18:24
1	1	Preventivo	CAMBI OS	CAMBIAR BOMBA DE ENGRASE	1:46 - 22:00
2	3	Correctivo	SH	SH Corte de topes en Rueda Guia RH- LH	11:03 - 18:24
3	3	Correctivo	CAMBI OS	Cambiar rodillos superior	1:46 - 22:00

Fuente: elaborado por los investigadores

3.2.3 Validación

Tabla N°26: tabla del error pronóstico

(MTTR) Tiempo medio para reparar de la flota de palas hidráulicas (Hrs)				$e_t = Y_t - Y'_t$	
Iteración	MTTR REAL	MTTR PRONÒSTICO	Error	Error ²	
1	1.46	1.46	0	0	
2	1.46	1.46	0	0	
3	1.46	1.46	0	0	
4	1.11	1.11	0	0	
5	1.46	1.11	0.35	0.1225	
6	1.46	1.46	0	0	
7	1.1	1.11	-0.01	0.0001	
8	1.46	1.46	0	0	
9	1.1	1.1	0	0	
10	1.11	1.11	0	0	
11	1.11	1.46	-0.35	0.1225	
12	1.1	1.11	-0.01	0.0001	
13	1.46	1.46	0	0	
14	1.11	1.46	-0.35	0.1225	
15	1.46	1.46	0	0	
16	1.1	1.1	0	0	
17	1.1	1.46	-0.36	0.1296	
18	11.03	1.1	9.93	98.6049	
19	1.1	1.46	-0.36	0.1296	
20	1.46	1.1	0.36	0.1296	
21	1.11	1.11	0	0	
22	1.1	1.1	0	0	
1	1.46	1.46	0	0	
2	1.46	1.1	0.36	0.1296	
3	1.46	1.46	0	0	

Fuente: elaborado por los investigadores

Interpretación: Para obtener el error restamos el MTTR real menos el MTTR del pronóstico, obteniendo de esta forma el error del pronóstico; para eliminar los negativos, elevamos al cuadrado cada resultado utilizando la ecuación 11.

Tabla N°27: Tabla del error cuadrático medio

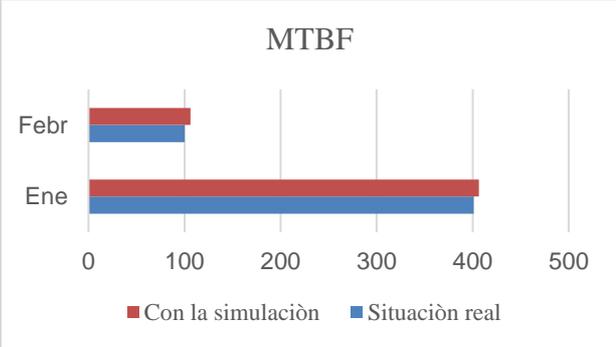
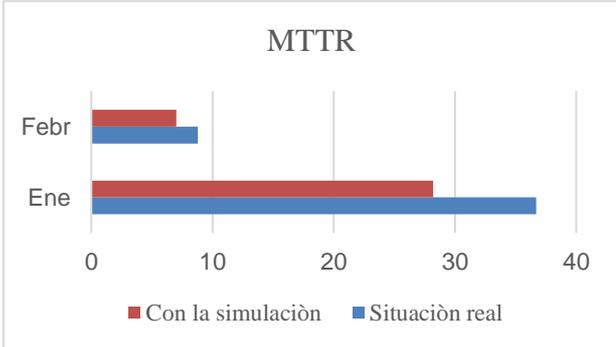
Error Cuadrático Medio (MSE)	3.97964
-------------------------------------	----------------

Fuente: elaborado por los investigadores

3.3 Análisis de resultados

Como se observa en la tabla de resultados se hace una comparación de la situación real y la simulada; en el MTBF se puede notar el aumento de las cifras, lo cual prueba la mejoría que la simulación Montecarlo produce en los datos, ya que, mientras más alto sea este dato más confiable; seguidamente en el MTTR, se observa la disminución de las horas por mes de reparación; también observamos que el porcentaje de tiempo de parada de máquina es menor y más constante; se observa también el porcentaje de la disponibilidad la cual es mayor a la situación real, por lo que la maquinaria estará más disponible; por último el costo de parada de máquina disminuyó considerablemente al costo real, disminuyó en 899242.15 USD.

Tabla N°28: Tabla comparativa de resultados

Indicador	Resultados Ene-Feb Situación real	Resultados Ene-Feb con la simulación	Gráfico comparativo
Tiempo medio entre fallas (MTBF)	401.1 horas/mes	406.6 horas/mes	
	100 horas/mes	106.2 horas/mes	
Tiempo medio para reparar (MTTR)	36.7 horas/mes	28.2 horas/mes	
	8.8 horas/mes	7 horas/mes	

<p>Tiempo de parada de máquina</p>	<p>9% 10%</p>	<p>7% 7%</p>	<p>Tiempo de parada de máquina</p> <p>Febr Ene</p> <p>0% 5% 10% 15%</p> <p>■ Con la simulación ■ Situación real</p>
<p>Disponibilidad</p>	<p>92% 92%</p>	<p>94% 94%</p>	<p>Disponibilidad</p> <p>Febr Ene</p> <p>91% 92% 93% 94% 95%</p> <p>■ Con la simulación ■ Situación real</p>
<p>Lucro cesante</p>	<p>El costo que genera la parada de la situación real es 3993899.73 USD/hr</p>	<p>El costo que genera la parada de máquina con la simulación es 3094657.57 USD/hr</p>	<p>Lucro cesante</p> <p>Costo</p> <p>0 2000000 4000000 6000000</p> <p>■ Con la simulación ■ Situación real</p>

Fuente: elaborado por los investigadores

CAPÍTULO IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

4.1 Discusión

En esta investigación se tuvo como objetivo principal diseñar un modelo de programa de mantenimiento usando simulación Montecarlo para pronosticar la disponibilidad y el lucro cesante, diferentes investigadores plantean la importancia de pronosticar estos indicadores. Como explica en su investigación los autores (Silva, Viana, y Queiroz, 2016) pronosticar la disponibilidad de los equipos es un paso fundamental en cualquier proceso de gestión. Esta capacidad ayuda a predecir los costos de mantenimiento y las acciones necesarias para garantizar la fiabilidad de los activos.

Uno de los principales hallazgos que se ha logrado ha sido la correcta elaboración y uso de un programa de mantenimiento, adecuado a las necesidades de la empresa, demostrando que la simulación Montecarlo usada ayuda al correcto pronóstico de disponibilidad y lucro cesante, también se identifica la pala en la se produce el fallo; lo cual hace de este programa de mantenimiento el más adecuado, ya que se ha demostrado que es factible para realizar este tipo de programas, (Viveros et al. 2013) y (Sobral & Guedes Soares, 2016) concluyen que, el correcto método de aplicación en mantenimiento, las mejores técnicas de uso y la previsión de fallos del equipo depende cada vez más de la calidad tecnológica de las actividades de mantenimiento desplegado, implementar un buen mantenimiento preventivo con el correcto pronóstico minimiza costos de mantenimiento convencional, así como también, (Viveros et al. 2013) y (Escudero Chávez Andre, 2016) aseguran que la falta de un adecuado programa de mantenimiento y la poca indisponibilidad de los sistemas (o equipos) genera costos de ineficiencia por no producción o por falta de servicio.

Se trabajó con los datos obtenidos de la empresa, sin embargo, no se obtuvieron datos completos y precisos, sobre todo en los tiempos de los tipos de servicio que se daba a las palas; esto limito gradualmente al momento de obtener los rangos de tiempos; se utilizó un tiempo estándar para todos los datos no obtenidos dentro de los recopilados de la empresa. Esta simulación del programa de mantenimiento nos ayudó a lograr los objetivos del estudio; sin embargo, es solo una base de una simulación posterior que se podría lograr con los datos completos, se puede obtener más resultados, tales como costos por tipos de servicios, tiempos exactos de las reparaciones y no solo rangos, así como también las piezas necesarias para los mantenimientos; todo esto adecuándolo de acuerdo a la necesidad de la empresa o programa de mantenimiento.

Ya que la presente investigación carece de antecedentes donde se haya utilizado la simulación Montecarlo en programas de mantenimiento, el mayor aporte científico que se brinda es que esta simulación es factible para este tipo de mantenimientos en empresas mineras, pero a su vez se pudo comprobar que esta simulación no solo se limita a programas de mantenimiento, sino también al mantenimiento de cualquier equipo o maquinaria en cualquier empresa de cualquier rubro como por ejemplo: hospitales y clínicas. Se adecuaría perfectamente a este tipo de empresas que tengan maquinaria operativa en sus procesos.

4.2 Conclusión

Con base a los resultados obtenidos en la investigación se concluyó lo siguiente:

- Se logró diagnosticar el programa de mantenimiento actual de la empresa minera, hallando y analizando sus principales indicadores y deficiencias
- Se pudo diseñar un modelo de simulación montecarlo identificando sus principales atributos, de acuerdo a las necesidades de la empresa

- Se logró analizar la efectividad del nuevo programa de mantenimiento mediante el cálculo del error cuadrático que validó el diseño, también se logró pronosticar la disponibilidad y el lucro cesante de una manera más acertada.

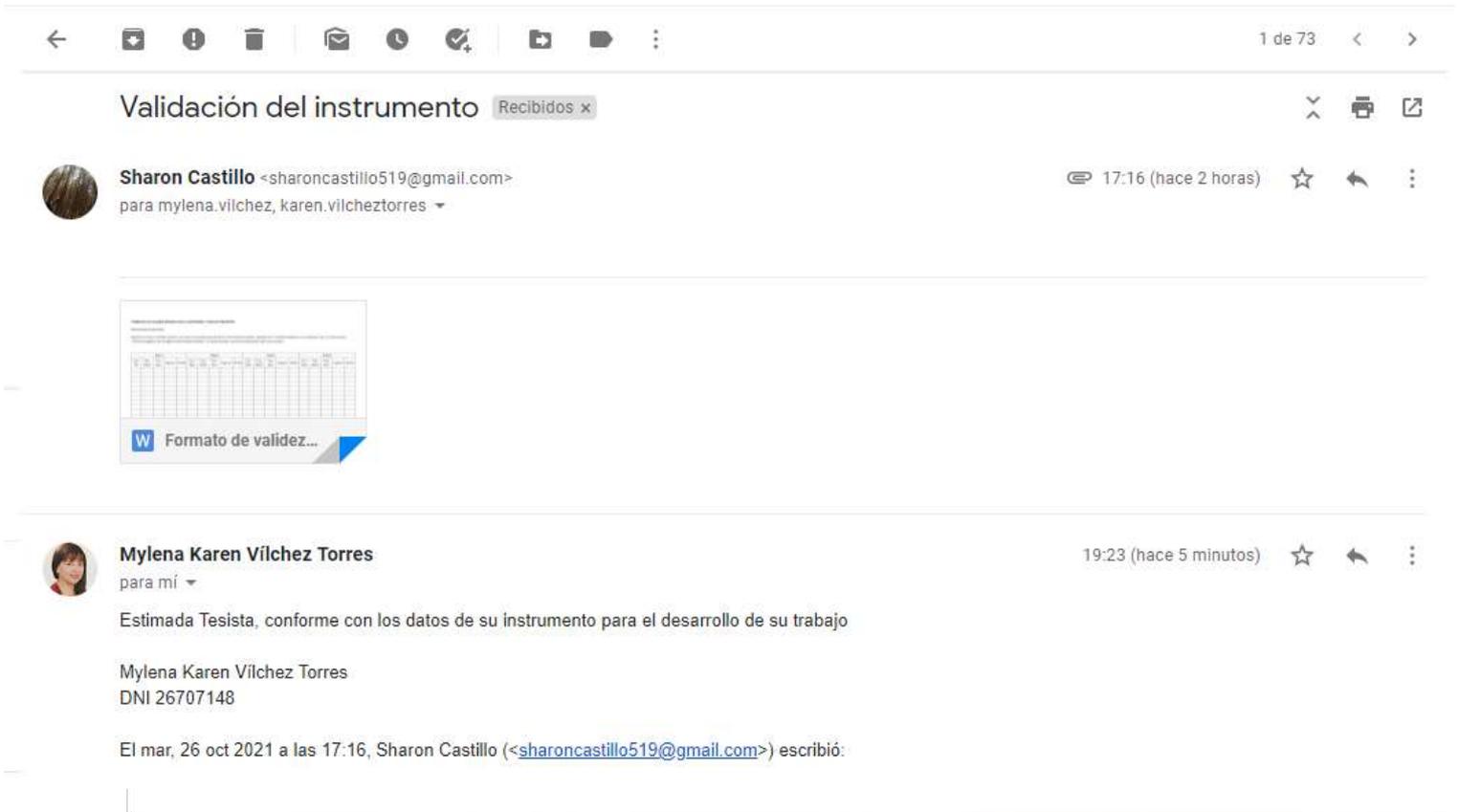
REFERENCIAS

- Magdiel Ablan, Marquez, Renny, Rivas, Yuraima, Molina, Ana, y Querales, José. 2011. «Una librería en R para validación de modelos de simulación».
- Pinedo Chapa, Joely Mireilli. 2018. «Propuesta de un modelo de pronósticos de demanda y gestión de inventarios para la planeación de demanda en prendas de vestir juvenil».
- Silva, Franco Jefferds dos Santos, Herbert Ricardo García Viana, y André Nasser Aquino Queiroz. 2016. «Availability Forecast of Mining Equipment». *Journal of Quality in Maintenance Engineering* 22(4):418-32. doi: 10.1108/JQME-12-2015-0067.
- Taha, Hamdy A. 2012. *Investigación de operaciones*. México, D.F., México: Pearson Educación.
- Vílchez Torres, Mylena Karen, Marina Consuelo Villar Cabellos, Jimmy Frank Oblitas Cruz, Yvan Leonidas Peláez Villanueva, y Sara Rocío Rojas Cacho. 2020. «Enfoque Holístico en la Priorización de Componentes Críticos Reparables». en *Proceedings of the 18th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology: Engineering, Integration, And Alliances for A Sustainable Development* "Hemispheric Cooperation for Competitiveness and Prosperity on A Knowledge-Based Economy". Latin American and Caribbean Consortium of Engineering Institutions.
- Viveros, Pablo, Raúl Stegmaier, Fredy Kristjanpoller, Luis Barbera, y Adolfo Crespo. 2013. «Propuesta de un modelo de gestión de mantenimiento y sus principales herramientas de apoyo». *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería* 21(1):125-38. doi: 10.4067/S0718-33052013000100011.
- Escudero Chávez André. (2016). Propuesta de un programa maestro de mantenimiento preventivo para reducir los costos operativos en la empresa Productos Industriales del Cuero S.A.C. - Trujillo. Universidad Privada del Norte.
- Geraldine Cristina Salazar Hernández, J. C. P. V. (2017). Optimización del stock de componentes críticos, utilizando distribuciones de probabilidad para reducir costos e incrementar la disponibilidad de palas hidráulicas en minería. Universidad Privada del Norte.
- Hernández Sampieri, R., Baptista Lucio, P., & Fernández Collado, C. (2014). Metodología de la investigación. McGraw-Hill Interamericana.
- Sobral, J., & Guedes Soares, C. (2016). Preventive Maintenance of Critical Assets based on Degradation Mechanisms and Failure Forecast. IFAC-PapersOnLine, 49(28), 97-102. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.11.017>
- SPECIFICATIONS & APPLICATION HANDBOOK Edition 27*. (s. f.). 964.
- (N.d.). Buenaventura.Com. Retrieved October 21, 2021, from <https://www.buenaventura.com/assets/memoria-2018/es/assets/pdf/operaciones.pdf>

- Dirección y Gestión de Paradas de Planta - Predictiva21. (2020, February 3). Predictiva21.Com. <https://predictiva21.com/direccion-gestion-paradas-planta-pmi/>
- Franciosi, C., Lambiase, A., & Miranda, S. (2017). Sustainable Maintenance: A Periodic Preventive Maintenance Model with Sustainable Spare Parts Management. *IFAC-PapersOnLine*, 50(1), 13692-13697. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2017.08.2536>
- Bülbül, P., Bayındır, Z. P., & Bakal, İ. S. (2019). Exact and heuristic approaches for joint maintenance and spare parts planning. *Computers & Industrial Engineering*, 129, 239-250. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.01.032>

ANEXOS

Anexo N°1: Correo de validación del instrumento



← [Icons] 1 de 73 < >

Validación del instrumento Recibidos x [Icons]

Sharon Castillo <sharoncastillo519@gmail.com>
para mylena.vilchez, karen.vilcheztorres ▾ 17:16 (hace 2 horas) ☆ ↶ ⋮



Mylena Karen Vilchez Torres 19:23 (hace 5 minutos) ☆ ↶ ⋮
para mí ▾

Estimada Tesista, conforme con los datos de su instrumento para el desarrollo de su trabajo

Mylena Karen Vilchez Torres
DNI 26707148

El mar, 26 oct 2021 a las 17:16, Sharon Castillo (<sharoncastillo519@gmail.com>) escribió:

Anexo N°3: Validación del instrumento

FORMATO DE VALIDEZ BASADA EN EL CONTENIDO: FICHA DE REGISTRO

Estimado(a) experto(a):

Reciba mis más cordiales saludos, el motivo de este documento es informarle que estoy realizando la validez basada en el contenido de un instrumento "Ficha de registro del tiempo de operaciones de las palas". En este sentido, solicito la evaluación del instrumento.

	Pala 1	Pala 2	Pala 3	Pala 4
Tiempo de excavacion				
Tiempo de giro (con carga)				
Tiempo de descarga				
Tiempo de retorno (sin carga)				
Tiempo de posicionamiento				
Capacidad de cuchara				
Tiempo de operacion				