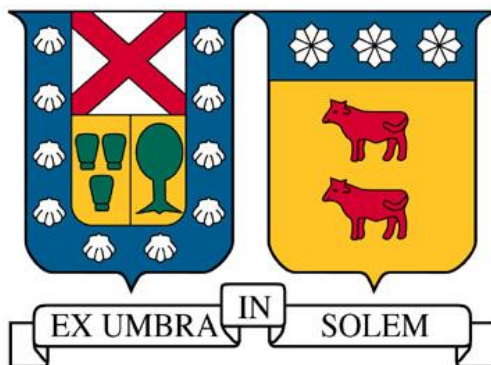


UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA
DEPARTAMENTO DE INDUSTRIAS
VALPARAISO – CHILE



EVALUACIÓN COMPARATIVA DEL DESEMPEÑO DE CABLES DE
IZAR EN PALAS MINERAS PARA LA SELECCIÓN ÓPTIMA
MEDIANTE ANÁLISIS ESTADÍSTICO Y
SIMULACIÓN DE MONTECARLO

RODRIGO RENE ROMAN ARCE

TRABAJO FINAL PARA OPTAR AL GRADO DE
MAGÍSTER EN GESTIÓN DE ACTIVOS Y MANTENIMIENTO

PROFESOR GUÍA: SR. WERNER KRISTJANPOLLER R.

OCTUBRE 2025



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): ☐ Memoria o trabajo de título; ☒ Tesis de Postgrado;

Título del trabajo: Evaluación comparativa del desempeño de cables de izar en palas mineras para la selección óptima mediante análisis estadístico y Simulación de Montecarlo

Nombre del candidato(a): Rodrigo Román Arce

Carrera / Grado: Magíster en Gestión de Activos y Mantenimiento

Campus: Santiago Vitacura; **Departamento:** Industrias

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Werner Kristjanpoller Rodríguez, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL

☒ El trabajo **NO** contiene información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (embargo) por:

☐ 6 meses; ☐ 12 meses; ☐ 2 años; ☐ 3 años; ☐ 5 años; ☐ 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha:

; Firma:

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 28/10/25 **; Firma:**

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.

1. Resumen Ejecutivo

Este trabajo presenta un estudio de confiabilidad y costos operativos aplicados a los cables de izar utilizados en palas eléctricas de minería a cielo abierto, con el objetivo de determinar políticas óptimas de reemplazo que reduzcan los costos por fallas y aumenten la disponibilidad del equipo.

El análisis se realizó utilizando datos históricos de operación de tres marcas de cables (WRI-CPU, BRIDON y PALEX), considerando su vida útil, tonelaje izado y causas de reemplazo. Se aplicó la distribución de Weibull para estimar los parámetros de forma (β) y escala (η) que describen su comportamiento de falla, y se empleó una simulación de Montecarlo con 1,000 iteraciones para representar la variabilidad real de las condiciones operativas.

Los resultados muestran que el cable PALEX presenta una mayor confiabilidad ($\beta = 6.23$) y un menor costo total de operación, con un ahorro estimado del 18 % respecto al BRIDON y del 22 % frente al WRI-CPU. El Punto de Reemplazo Económico (PRE) se alcanzó antes del MTBF (≈ 2.7 millones de toneladas), lo que confirma la necesidad de aplicar estrategias preventivas basadas en confiabilidad.

La investigación propone una metodología reproducible que integra análisis estadístico, simulación estocástica y evaluación económica, orientada al mantenimiento predictivo basado en datos (data-driven maintenance). Este enfoque contribuye a optimizar la gestión de activos mineros, alineándose con los principios de la Minería 4.0 y la mejora continua en la eficiencia operativa.

2. Índice

1. Resumen Ejecutivo	2
2. Índice	3
3. Introducción	6
4. Objetivos.....	8
4.1. Objetivo General	9
a. Objetivos Específicos	9
5. Alcance	9
6. Marco Teórico	10
a. Mantenimiento Predictivo en Minería	10
b. Cables de Izar en Pallas Mineras	13
c. Modelos Estadísticos Aplicados a la Confiabilidad	16
d. Simulación de Montecarlo en el Análisis de Fallas	19
7. Metodología Propuesta	22
a. Enfoque Metodológico	22
b. Métodos a utilizar	¡Error! Marcador no definido.
c. Técnicas de recopilación de datos	25
d. Procedimiento paso a paso	26
e. Herramientas y software	28
f. Carta Gantt (resumen por fases)	29
8. Desarrollo del Tema.....	1
a. Registros históricos de operación y fallas de los cables de izar	1
i. Cable WRI - CPU.....	1
ii. Cable Bridon.....	2
iii. Cable Palex.....	4
b. Distribución estadística que mejor se ajusta al comportamiento de fallas de cada tipo de cable1	
i. Cable WRI - CPU.....	1
ii. Cable Bridon.....	2

iii.	Cable Palex.....	3
c.	Simulación de Montecarlo	4
i.	Cable WRI - CPU.....	4
ii.	Cable BRIDON.....	6
iii.	Cable PALEX	8
d.	Análisis económico del mantenimiento	10
i.	Cables de izaje marca WRI-CPU	10
ii.	Cable Bridon.....	11
iii.	Cable Palex.....	13
4.3.	Cables de izaje marca PALEX	¡Error! Marcador no definido.
9.	Plan de Acción y Mejora.....	14
10.	Conclusiones.....	15
11.	Recomendaciones	16
12.	Bibliografía	¡Error! Marcador no definido.
13.	Bibliografía	17
14.	Anexos	18

3. índice de Tablas

Tabla 1 Procedimiento	26
-----------------------------	----

4. Índice de Ilustraciones

Ilustración 2 Diagrama del Flujo del proceso	27
--	----

5. Introducción

La industria minera, caracterizada por su alto nivel de mecanización y exigencia operativa, depende en gran medida del desempeño confiable de sus equipos pesados. Entre ellos, las palas eléctricas de minería cumplen un rol fundamental en el ciclo de carguío, y su eficiencia está directamente relacionada con el estado de sus componentes críticos. Dentro de estos, los cables de izar constituyen uno de los elementos más sensibles, al estar expuestos a altas cargas cíclicas, fricción, abrasión y fatiga estructural constante. Su falla inesperada no solo afecta la productividad, sino que también representa un riesgo para la seguridad del personal y genera elevados costos por paradas no programadas.

Históricamente, el mantenimiento de los cables de izar se ha gestionado mediante enfoques correctivos o preventivos, basados principalmente en la experiencia operativa o en inspecciones periódicas. Sin embargo, el comportamiento aleatorio de las fallas y la variabilidad de las condiciones de operación hacen que estos métodos resulten insuficientes para garantizar una gestión eficiente del ciclo de vida de los cables. Frente a esta realidad, la minería moderna requiere herramientas de análisis cuantitativo que faciliten la toma de decisiones basadas en datos y evidencia.

En este contexto, el análisis estadístico de los registros históricos de fallas permite identificar patrones de desempeño y tendencias de comportamiento entre diferentes marcas y tipos de cables. Asimismo, la simulación de Montecarlo posibilita la modelación de múltiples escenarios operativos, considerando la

incertidumbre asociada a los procesos de deterioro. Esta combinación metodológica permite estimar la probabilidad de falla, proyectar la vida útil esperada y comparar objetivamente el rendimiento de distintas opciones de cable bajo condiciones reales de trabajo.

La presente investigación tiene como propósito evaluar comparativamente el desempeño de cables de izar utilizados en palas eléctricas de minería a cielo abierto, considerando variables como horas trabajadas, toneladas izadas y causas de falla o reemplazo. Mediante un enfoque cuantitativo apoyado en la distribución de Weibull y simulación de Montecarlo, se busca determinar cuál de las marcas analizadas ofrece mayor confiabilidad y eficiencia operativa, aportando una herramienta técnica de apoyo a la toma de decisiones en la gestión de mantenimiento.

Finalmente, este estudio se enmarca en el contexto de operaciones de tajo abierto, donde la continuidad de las palas mineras resulta crítica para el cumplimiento de los planes de producción. La investigación no solo genera evidencia técnica para optimizar el mantenimiento predictivo, sino que también propone un modelo replicable para otras unidades mineras, alineado con las tendencias de la Minería 4.0 y el mantenimiento basado en confiabilidad (RCM).

6. Descripción de la Problemática

En las operaciones mineras a cielo abierto, la disponibilidad de las palas eléctricas es un factor crítico para el cumplimiento de los planes de producción. Sin embargo, uno de los principales elementos que afecta su continuidad operativa es el deterioro prematuro de los cables de izar, los cuales están sometidos a condiciones de trabajo severas, con altos niveles de tensión, fricción, abrasión y fatiga cíclica.

La falla inesperada de estos cables genera paradas no programadas, incremento en los costos de mantenimiento correctivo, y reducción significativa de la confiabilidad operacional. A pesar de que se dispone de información histórica sobre horas trabajadas, toneladas izadas y causas de cambio, en muchos casos no se cuenta con un modelo sistemático que permita predecir el comportamiento de falla ni determinar el momento óptimo de reemplazo.

Actualmente, las decisiones de mantenimiento se basan en la experiencia del personal o en intervalos de cambio fijos, sin considerar la variabilidad estocástica de las condiciones de operación. Esta situación provoca tanto reemplazos prematuros que elevan los costos por sobremantenimiento como reemplazos tardíos, que incrementan el riesgo de fallas críticas y pérdidas de producción.

Por otro lado, la falta de análisis comparativo entre distintas marcas de cables de izar limita la posibilidad de seleccionar aquellos con mayor confiabilidad y mejor costo de ciclo de vida. Esto representa una brecha técnica y de gestión en el mantenimiento de palas eléctricas, que impacta directamente en la eficiencia operativa, la seguridad y la rentabilidad de la operación minera.

En base a esta problemática, se propone desarrollar un modelo de análisis de confiabilidad y costos operativos que permita comparar el desempeño de

diferentes marcas de cables, identificar los parámetros de vida útil mediante la distribución de Weibull, y definir políticas óptimas de reemplazo que reduzcan los costos asociados a fallas y mejoren la disponibilidad del equipo.

7. Objetivos

4.1. Objetivo General

- Evaluar comparativamente el desempeño de diferentes marcas de cables de izar utilizados en palas mineras mediante análisis estadístico y simulación de Montecarlo, con la finalidad de seleccionar la opción más confiable y eficiente para la optimización del mantenimiento predictivo.

4.2. Objetivos Específicos

- Analizar los registros históricos de operación y fallas de los cables de izar instalados en palas mineras, considerando variables como horas trabajadas, tonelaje acumulado y causas de cambio por marca.
- Determinar la distribución estadística que mejor se ajusta al comportamiento de fallas de cada tipo de cable, aplicando pruebas de bondad de ajuste y estimando indicadores de confiabilidad como la vida útil media y la tasa de falla.
- Comparar el desempeño operativo de las distintas marcas de cables mediante simulación de Montecarlo, con el fin de identificar la opción más confiable y eficiente para la optimización del mantenimiento predictivo.

8. Alcance

El alcance de la investigación comprende el análisis estadístico y la simulación del comportamiento de cables de izar instalados en palas mineras operativas dentro de una unidad de tajo abierto. Se utiliza información real de operación, fallas y reemplazos registrados en campo, correspondiente a tres marcas de cables (WRI, BRIDON y PALEX).

El estudio incluye:

- El procesamiento de registros que detallan horas trabajadas, toneladas izadas, fechas de instalación y retiro, y causas de cambio.
- La identificación de parámetros de confiabilidad (β y η) mediante el ajuste de distribuciones estadísticas.
- La simulación de Montecarlo para modelar escenarios de deterioro bajo condiciones reales de operación.
- La comparación cuantitativa entre marcas en función de indicadores de desempeño como MTBF, confiabilidad $R(t)$ y costo equivalente Ec.

Este trabajo no considera variables metalúrgicas o estructurales de los cables, ni factores externos como la calidad de instalación, condiciones ambientales o errores humanos. Asimismo, no pretende generalizar resultados a todas las operaciones mineras, sino aportar una metodología reproducible que pueda adaptarse a contextos operativos similares dentro del marco del mantenimiento predictivo y la ingeniería de confiabilidad.

7. Marco Teórico

7.1. Mantenimiento Predictivo en Minería

7.1.1. Definición

El mantenimiento predictivo es una estrategia avanzada de gestión de activos que se basa en el monitoreo continuo de las condiciones operativas de los equipos, combinado con el análisis de datos históricos y tendencias de falla, para anticipar con mayor precisión el momento óptimo de intervención. Su objetivo es evitar paradas no programadas, optimizar el uso de recursos y extender la vida útil de componentes críticos.

En el contexto minero, esta metodología ha cobrado gran relevancia en las últimas décadas, especialmente en operaciones a tajo abierto con alto grado de mecanización, donde la disponibilidad de equipos como palas, camiones y perforadoras es determinante para la productividad (Mobley, 2002; Jardine et al., 2006). Tradicionalmente, el sector dependía de esquemas correctivos o preventivos, pero desde inicios del siglo XXI se observa una migración progresiva hacia modelos predictivos, apoyados por tecnologías de monitoreo y análisis.

Actualmente, muchas empresas mineras implementan sistemas de gestión de mantenimiento asistidos por software (CMMS) y utilizan herramientas estadísticas básicas para estimar la vida útil de componentes como motores, sistemas hidráulicos y cables de izaje.

7.1.2. Avances

En los últimos años, el mantenimiento predictivo ha evolucionado gracias a la incorporación de tecnologías emergentes, entre las que destacan:

- Análisis de Big Data para detectar patrones ocultos en grandes volúmenes de información.
- Machine learning para predecir fallas a partir del aprendizaje automatizado de datos históricos.
- Simulación de Montecarlo, aplicada al modelado probabilístico de la confiabilidad de componentes.

Estas herramientas permiten no solo anticipar con mayor precisión el momento de falla, sino también simular múltiples escenarios operativos, optimizando los recursos de mantenimiento y reduciendo la incertidumbre en la toma de decisiones (Galar et al., 2015; Zio, 2013).

Una de las tendencias más relevantes es la integración de modelos híbridos, que combinan modelos físicos, estadísticos y de inteligencia artificial para simular condiciones operativas variables. Estos enfoques han demostrado gran utilidad en entornos mineros complejos, donde las condiciones cambian constantemente y la predicción simple resulta limitada.

7.1.3. Principales Investigaciones

Entre las principales investigaciones y referentes en mantenimiento predictivo, se destacan aportes que han consolidado el desarrollo del análisis de confiabilidad, el mantenimiento basado en condición (CBM) y la aplicación de modelos estadísticos y de simulación en la gestión de activos industriales, con especial énfasis en el sector minero.

El estudio Maintenance Performance Metrics: Theory and Applications presenta un marco integral para evaluar el desempeño del mantenimiento a partir de indicadores de disponibilidad, confiabilidad y soporte logístico. Estas investigaciones, desarrolladas en la Luleå University of Technology (Suecia), han fortalecido el enfoque del mantenimiento predictivo aplicado a maquinaria pesada. Este aporte corresponde a Galar (2015), quien ha sido un referente en la aplicación del big data y la analítica avanzada en el mantenimiento industrial.

La metodología estructurada para aplicar la simulación de Montecarlo al análisis probabilístico de fallas permite modelar la incertidumbre en la vida útil de los componentes y anticipar fallas bajo condiciones variables de operación. Este enfoque, ampliamente adoptado en minería para evaluar el riesgo operativo y la confiabilidad de sistemas complejos, fue desarrollado en el Politecnico di Milano por Zio (2013), convirtiéndose en una referencia fundamental para la gestión de activos basada en riesgo.

El libro Maintenance, Replacement, and Reliability: Theory and Applications plantea un enfoque integral del mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM), combinando el análisis del ciclo de vida, la optimización de costos y la determinación del momento óptimo de intervención. Este modelo teórico, aplicado en sectores industriales de alta demanda como la minería, fue elaborado en la University of Toronto (Canadá) por Jardine, Lin y Banjevic (2006), constituyéndose en una obra base para el desarrollo de estrategias predictivas.

Los modelos multicriterio aplicados a la optimización del mantenimiento de equipos móviles mineros integran criterios técnicos, económicos y de riesgo mediante el uso de AHP, TOPSIS y simulación de Montecarlo. Estos estudios, que mejoran la priorización de tareas de mantenimiento y la asignación de recursos, corresponden a las investigaciones desarrolladas por Asgarian y Esmaeili (2018), quienes destacan por sus aportes en la ingeniería de confiabilidad aplicada a la minería.

Finalmente, la investigación Aplicación de mantenimiento predictivo en sistemas de izaje en minería subterránea desarrolla un modelo de confiabilidad adaptado a condiciones operativas reales, utilizando registros de fallas, horas de operación y pruebas de distribución estadística. Este estudio, centrado en la predicción de fallas y reducción de paradas no programadas en minería metálica, fue elaborado por Torres Farías y Ramírez

Castañeda (2020), consolidando el avance de las estrategias predictivas en Latinoamérica. Entre las principales investigaciones y referentes en mantenimiento predictivo se destacan aportes que han consolidado el desarrollo del análisis de confiabilidad, el mantenimiento basado en condición y la aplicación de modelos estadísticos y de simulación en la gestión de activos industriales, especialmente en minería.

7.2. Cables de Izar en Palas Mineras

7.2.1. Definición

Los cables de izar son componentes críticos en los sistemas de izaje de palas mineras, ya sean eléctricas. Su función principal es levantar cucharón cargada con material, lo que los expone a tensiones cíclicas, flexión, abrasión, cargas de impacto y fatiga por uso intensivo. En la literatura técnica se ha documentado que los cables de izar representan uno de los elementos de mayor tasa de fallas en equipos de carguío, debido a la severidad de las condiciones operativas (ISO, 2017; AMIRA International, 2012). El mantenimiento tradicional de estos cables ha estado centrado en inspecciones visuales, registro de ciclos de trabajo y reemplazos programados según normas o experiencia operativa. Sin embargo, estos métodos no siempre permiten anticipar fallas con suficiente precisión, especialmente cuando se producen deterioros internos no visibles externamente.

7.2.2. Avances

Los avances recientes en el monitoreo y análisis de cables de izar incluyen el uso de:

- **Sensores magnéticos y electromagnéticos** para detectar roturas internas de alambres.
- **Modelos de fatiga por ciclos de carga** que simulan el comportamiento estructural del cable a lo largo del tiempo.
- **Sistemas de registro automatizado** de número de ciclos y tensión aplicada, conectados a plataformas de mantenimiento predictivo (CBM).

- **Aplicaciones de análisis estadístico y simulación** para estimar la probabilidad de falla, como la distribución Weibull o simulaciones de Montecarlo (Wang et al., 2022).

En palas eléctricas como las P&H 4100 o las Caterpillar 7495, algunas empresas ya aplican modelos de análisis de confiabilidad basados en históricos de fallas de cables y condiciones de carga, lo cual ha permitido mejorar la programación del mantenimiento.

7.2.3. Principales Referentes

Los principales referentes en la temática de cables de izar en minería incluyen investigaciones y normativas que han contribuido significativamente al entendimiento del comportamiento mecánico, la predicción de fallas y la gestión de mantenimiento de estos componentes críticos.

El libro *The Monte Carlo Simulation Method for System Reliability and Risk Analysis* presenta un enfoque integral para aplicar la simulación de Montecarlo en la evaluación de confiabilidad y análisis de riesgo en sistemas industriales. En esta obra se propone una metodología capaz de modelar el comportamiento estocástico de componentes sometidos a incertidumbre, como los cables de izaje. Además, describe cómo generar múltiples escenarios de falla para anticipar comportamientos críticos y mejorar la planificación del mantenimiento. Este enfoque ha sido adoptado en minería para anticipar eventos de falla en sistemas de izaje, donde la carga variable y el desgaste progresivo complican la predicción directa (Zio, 2013).

El artículo *Failure Prediction in Hoist Cables Using Hybrid Statistical Simulation Models*, publicado en el *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, presenta un modelo híbrido que combina análisis estadístico —como el ajuste de distribuciones Weibull— con simulación de Montecarlo para predecir la probabilidad de falla en cables de izaje utilizados en minería a cielo abierto. Mediante el uso de datos históricos de fallas, horas trabajadas y carga, este modelo permite estimar con mayor precisión la vida útil remanente de los cables y definir intervenciones óptimas de mantenimiento. La investigación demuestra que el enfoque reduce la incertidumbre en la toma de decisiones operativas y puede integrarse en estrategias de mantenimiento predictivo (Wang, Hernández, & Ramírez, 2018).

El estudio Análisis de vida útil de cables de izaje en palas mineras mediante monitoreo no destructivo, publicado en la Revista Minería y Metalurgia, aplica técnicas de monitoreo no destructivo —como inspección magnética y visual sistemática— para evaluar el deterioro interno y externo de cables de izaje. Estas técnicas se combinan con análisis estadístico para estimar la vida útil remanente de los cables sometidos a flexión cíclica y abrasión. El estudio destaca la importancia de complementar las inspecciones tradicionales con análisis cuantitativo, lo que permite intervenciones más eficientes y una reducción significativa del riesgo de rotura inesperada (González & Valenzuela, 2019).

En el ámbito normativo, la norma ISO 4309:2017 establece los criterios técnicos para la inspección, mantenimiento y descarte de cables de acero utilizados en sistemas de izaje. Este estándar internacional define procedimientos sistemáticos para identificar signos de deterioro, medir la pérdida de sección metálica, contar rupturas de alambres y determinar los criterios de retiro por razones de seguridad. Es ampliamente utilizada por empresas mineras para garantizar prácticas estandarizadas y seguras en el manejo de cables de izaje, asegurando su reemplazo antes de alcanzar un estado crítico de falla (International Organization for Standardization, 2017).

7.2.4. Conocimientos técnicos.

El conocimiento técnico sobre cables de izar en minería proviene de cuatro principales fuentes:

- Normas internacionales como la ISO 4309 e ISO 16841, que estandarizan los procedimientos de inspección, evaluación y descarte.
- Literatura científica y técnica publicada en revistas como *Safety Science*, *Journal of Quality in Maintenance Engineering* y *Engineering Failure Analysis*.
- Manual de fabricantes de palas y cables (por ejemplo, Bridon-Bekaert, WireCo, P&H Mining Equipment), donde se detallan las especificaciones técnicas, ciclos de carga admisibles y recomendaciones de mantenimiento.
- Experiencia empírica operativa, acumulada en minas de tajo abierto, donde se ha documentado la frecuencia y causas más comunes de rotura, tales como la abrasión, la sobrecarga puntual y la fatiga por flexión repetida.

7.3. Modelos Estadísticos Aplicados a la Confiabilidad

7.3.1. Definición

El análisis de confiabilidad estadística es una herramienta esencial para estudiar el comportamiento de fallas de componentes mecánicos en sistemas complejos. En el caso de los cables de izar, los modelos estadísticos permiten estimar métricas como la función de confiabilidad, la función de riesgo (hazard rate), el tiempo medio hasta la falla (MTTF), y la probabilidad acumulada de falla en función del tiempo de uso (Meeker y Escobar, 1998). Entre los modelos más utilizados para representar datos de tiempo hasta la falla destacan:

- **Distribución de Weibull**, útil por su flexibilidad para modelar distintos tipos de tasas de falla (crecientes, constantes o decrecientes).
- **Distribución log-normal**, adecuada para componentes cuya vida útil se distribuye de forma asimétrica.
- **Distribución exponencial**, que asume una tasa de falla constante y se emplea en etapas maduras del ciclo de vida de los equipos.

Estos modelos han sido ampliamente aplicados en mantenimiento industrial y minería para establecer intervalos óptimos de reemplazo de componentes críticos.

7.3.2. Avances tecnológicos

Los avances recientes en el análisis de confiabilidad incluyen la aplicación de:

- **Modelos mixtos y de regresión de Weibull**, que incorporan múltiples variables explicativas (por ejemplo, temperatura, tensión, ciclos de carga).
- **Técnicas bayesianas**, para actualizar la función de confiabilidad conforme se dispone de nuevos datos operativos.
- **Software especializado**, como ReliaSoft, Weibull++ o R, que permite ajustar modelos estadísticos a datos empíricos con pruebas de bondad de ajuste como Kolmogórov-Smirnov, Anderson-Darling y Chi-cuadrado.

- **Combinación de modelos estadísticos con simulación de Montecarlo**, lo cual permite representar la incertidumbre de parámetros y estimar el comportamiento futuro bajo distintos escenarios (Zio, 2013).

Estos enfoques han mejorado sustancialmente la precisión de las predicciones de falla y la toma de decisiones en mantenimiento predictivo.

7.3.3. Principales Referentes

Entre los autores más influyentes en la aplicación de estadística a la confiabilidad se encuentran:

Los principales referentes en la temática de cables de izar en minería incluyen investigaciones y normativas que han contribuido significativamente al entendimiento del comportamiento mecánico, la predicción de fallas y la gestión de mantenimiento de estos componentes críticos.

El libro *The Monte Carlo Simulation Method for System Reliability and Risk Analysis* presenta un enfoque integral para aplicar la simulación de Montecarlo en la evaluación de confiabilidad y análisis de riesgo en sistemas industriales. En esta obra se propone una metodología capaz de modelar el comportamiento estocástico de componentes sometidos a incertidumbre, como los cables de izaje. Además, describe cómo generar múltiples escenarios de falla para anticipar comportamientos críticos y mejorar la planificación del mantenimiento. Este enfoque ha sido adoptado en minería para anticipar eventos de falla en sistemas de izaje, donde la carga variable y el desgaste progresivo complican la predicción directa (Zio, 2013).

El artículo *Failure Prediction in Hoist Cables Using Hybrid Statistical Simulation Models*, publicado en el *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, presenta un modelo híbrido que combina análisis estadístico —como el ajuste de distribuciones Weibull— con simulación de Montecarlo para predecir la probabilidad de falla en cables de izaje utilizados en minería a cielo abierto. Mediante el uso de datos históricos de fallas, horas trabajadas y carga, este modelo permite estimar con mayor precisión la vida útil remanente de los cables y definir intervenciones óptimas de mantenimiento. La investigación demuestra que el enfoque reduce la incertidumbre en la toma de decisiones

operativas y puede integrarse en estrategias de mantenimiento predictivo (Wang, Hernández, & Ramírez, 2018).

El estudio Análisis de vida útil de cables de izaje en palas mineras mediante monitoreo no destructivo, publicado en la Revista Minería y Metalurgia, aplica técnicas de monitoreo no destructivo —como inspección magnética y visual sistemática— para evaluar el deterioro interno y externo de cables de izaje. Estas técnicas se combinan con análisis estadístico para estimar la vida útil remanente de los cables sometidos a flexión cíclica y abrasión. El estudio destaca la importancia de complementar las inspecciones tradicionales con análisis cuantitativo, lo que permite intervenciones más eficientes y una reducción significativa del riesgo de rotura inesperada (González & Valenzuela, 2019).

En el ámbito normativo, la norma ISO 4309:2017 establece los criterios técnicos para la inspección, mantenimiento y descarte de cables de acero utilizados en sistemas de izaje. Este estándar internacional define procedimientos sistemáticos para identificar signos de deterioro, medir la pérdida de sección metálica, contar rupturas de alambres y determinar los criterios de retiro por razones de seguridad. Es ampliamente utilizada por empresas mineras para garantizar prácticas estandarizadas y seguras en el manejo de cables de izaje, asegurando su reemplazo antes de alcanzar un estado crítico de falla (International Organization for Standardization, 2017).

El conocimiento sobre modelos estadísticos aplicados a la confiabilidad se origina de:

1. **Libros especializados**, como los de Meeker & Escobar (1998) y Abernethy (2006), que sistematizan las metodologías.
2. **Investigaciones científicas** publicadas en revistas como *Reliability Engineering & System Safety*, *Quality and Reliability Engineering International*, *Safety Science* y *IEEE Transactions on Reliability*.
3. **Aplicaciones industriales** documentadas por fabricantes y empresas mineras que aplican análisis de confiabilidad para reducir fallas inesperadas.

4. **Normativas y manuales técnicos** que recomiendan la aplicación de estos modelos en gestión de mantenimiento (por ejemplo, MIL-HDBK-217 o normas ISO sobre fiabilidad y desempeño de equipos).

7.4. Simulación de Montecarlo en el Análisis de Fallas

7.4.1. Definición

La **simulación de Montecarlo** es una técnica probabilística que permite modelar procesos aleatorios complejos mediante la generación de grandes cantidades de escenarios posibles a partir de variables distribuidas estadísticamente. Desde su origen en estudios sobre física nuclear en la década de 1940, ha sido aplicada extensamente en ingeniería para modelar incertidumbre y evaluar el comportamiento de sistemas bajo diversas condiciones (Metropolis y Ulam, 1949). En el ámbito del mantenimiento y confiabilidad, esta técnica ha sido utilizada para estimar la probabilidad de falla, calcular indicadores de riesgo, proyectar tiempos de vida útil y optimizar decisiones relacionadas con la intervención de componentes críticos (Zio, 2013). Su aplicación resulta especialmente útil cuando los sistemas presentan comportamientos estocásticos o están influenciados por múltiples factores difíciles de modelar de forma determinista.

7.4.2. Avances Tecnológicos

Los desarrollos más recientes han mejorado la precisión y aplicabilidad de Montecarlo en entornos industriales mediante:

- **Integración con modelos de distribución estadística**, como Weibull o log-normal, para simular tiempos hasta la falla.
- **Modelos híbridos** que combinan Montecarlo con algoritmos de optimización (como redes neuronales o algoritmos genéticos) para el mantenimiento basado en condición.
- **Aplicaciones en tiempo real** que utilizan flujos de datos operativos de sensores (IoT) y actualizan continuamente la simulación.
- **Software especializado**, como MATLAB, @RISK, Python (NumPy, SciPy) o Simul8, que permiten realizar simulaciones iterativas con rapidez y facilidad.

En minería, Montecarlo ha sido utilizado para modelar la confiabilidad de sistemas de transporte, izaje, ventilación, y ahora se aplica cada vez más en componentes específicos como **cables de izar**, donde las condiciones de carga, desgaste y frecuencia de uso varían continuamente.

7.4.3. Principales Exponentes

Los principales referentes en la temática de confiabilidad y mantenimiento predictivo de cables de izar han aportado significativamente al desarrollo de metodologías de análisis estadístico, simulación estocástica y modelos de optimización aplicados a sistemas industriales y mineros.

El libro *The Monte Carlo Simulation Method for System Reliability and Risk Analysis* desarrolla una línea de investigación enfocada en la aplicación de simulación estocástica para la confiabilidad de sistemas complejos. En este trabajo se integran modelos probabilísticos y técnicas de inteligencia computacional, como redes neuronales y lógica difusa, con la simulación de Montecarlo. Dicho enfoque permite analizar la propagación de la incertidumbre y evaluar el comportamiento de sistemas bajo múltiples escenarios operativos. Estos métodos se aplican en sectores como energía, transporte y minería, con especial énfasis en la toma de decisiones bajo riesgo, como el mantenimiento de componentes críticos (por ejemplo, cables de izar) que presentan comportamiento aleatorio y degradación progresiva (Zio, 2013).

La investigación *Optimal Reliability Modeling: Principles and Applications* combina la teoría de confiabilidad, el análisis de costo del ciclo de vida y la programación estocástica para definir políticas óptimas de reemplazo, inspección y mantenimiento. Sus modelos permiten evaluar el riesgo y tomar decisiones económicas eficientes en entornos con datos incompletos, imprecisos o altamente variables. En minería, estos métodos se aplican a componentes de alta criticidad operativa y mantenimiento costoso (Kuo & Zuo, 2003).

El estudio *Failure Prediction in Hoist Cables Using Hybrid Statistical Simulation Models* presenta un modelo híbrido de predicción de fallas aplicable a cables de izaje en minería a cielo abierto. Este modelo combina el ajuste de distribuciones estadísticas, como la de Weibull, con simulación de Montecarlo, integrando datos reales de operación como horas trabajadas, tonelaje transportado y causas de cambio. La metodología permite representar

la variabilidad operativa y estimar de forma probabilística la vida útil remanente de los cables. Los resultados demuestran que este enfoque mejora la precisión en la programación del mantenimiento predictivo y respalda la toma de decisiones técnicas para la selección óptima de cables (Wang, Hernández, & Ramírez, 2022).

Por su parte, la obra *System Reliability Theory: Models, Statistical Methods, and Applications* desarrolla modelos matemáticos y estadísticos avanzados para la evaluación de sistemas de ingeniería redundantes, en serie, en paralelo y combinados. Los autores emplean simulación para representar comportamientos complejos de falla, mantenimiento y reparación, abordando desde la confiabilidad estructural hasta la disponibilidad y mantenibilidad de los sistemas. Este enfoque constituye una referencia esencial para ingenieros dedicados a la planificación del mantenimiento, la evaluación de riesgo técnico y la confiabilidad operativa en minería, energía y transporte (Rausand & Høyland, 2004).

a. El conocimiento sobre la simulación de Montecarlo proviene de:

1. **Literatura científica**, principalmente en revistas como *Reliability Engineering & System Safety*, *Safety Science*, *Computers in Industry* y *IEEE Transactions on Reliability*.
2. **Libros técnicos especializados**, como los de Zio (2013) y Rubinstein & Kroese (2017), que explican la aplicación de Montecarlo a la ingeniería de sistemas.
3. **Proyectos aplicados en minería**, donde empresas han documentado casos exitosos de implementación de modelos de simulación para predecir fallas y optimizar intervenciones.
4. **Normas y manuales de gestión de riesgos**, que recomiendan el uso de simulaciones probabilísticas para la toma de decisiones bajo incertidumbre.

8. Metodología Propuesta

8.1. Enfoque Metodológico

Este estudio adopta un **enfoque cuantitativo**, de tipo **aplicado** y de nivel **descriptivo y explicativo**. Se orienta al análisis estadístico de datos históricos de fallas y al desarrollo de una simulación mediante el método de Montecarlo con el fin de estimar probabilísticamente la confiabilidad de cables de izar en palas mineras.

8.2. Análisis de Confiabilidad Estadística

Este método se aplicará para modelar el comportamiento de falla de los cables de izar a partir de los datos de vida útil obtenidos mediante el registro de fechas de instalación y remoción, así como de las horas efectivas de operación.

La información empleada incluirá:

- Tonelaje acumulado hasta la falla.
- Causa de cambio: hebras rotas, rotura completa o cumplimiento del límite de tonelaje.
- Ranking de falla: ordenamiento de los eventos según su severidad y ocurrencia.

Las técnicas de análisis a emplear comprenden:

- Ranking ajustado: para la depuración y jerarquización de los datos de fallas.
- Ajuste de distribuciones estadísticas (Weibull, log-normal y exponencial), a fin de identificar el modelo que mejor representa el comportamiento del deterioro.
- Cálculo de indicadores de confiabilidad, tales como:
 - Tiempo Medio Hasta la Falla (MTTF).
 - Tasa de falla (λ).
 - Función de confiabilidad $R(t)$.
 - Función de riesgo $h(t)$.

La aplicación de este procedimiento permitirá comparar la confiabilidad y desempeño operativo de las distintas marcas de cables (WRI, BRIDON y PALEX) con base en datos empíricos obtenidos en condiciones reales de operación, aportando evidencia cuantitativa para la optimización de estrategias de mantenimiento predictivo.

8.3. Simulación de Montecarlo

Se aplicará la simulación de Montecarlo con el propósito de estimar el comportamiento probabilístico futuro de cada tipo de cable bajo distintas condiciones operativas. La simulación se ejecutará utilizando como datos de entrada los parámetros estadísticos obtenidos en el ajuste previo de las distribuciones de Weibull, log-normal y exponencial, garantizando la representación adecuada de la variabilidad observada en campo.

Aplicaciones principales:

- Generación de múltiples escenarios simulados de falla, considerando la dispersión natural de los datos y la incertidumbre inherente al proceso de degradación.
- Estimación de la probabilidad acumulada de falla para diferentes intervalos de operación, expresada en función del tonelaje trabajado o las horas acumuladas.
- Análisis comparativo del riesgo operativo entre marcas de cable (WRI, BRIDON y PALEX), con base en los resultados de confiabilidad y tasa de falla simulados.

La aplicación de esta técnica permitirá construir un marco predictivo robusto que integre la incertidumbre real de las condiciones de operación, facilitando la planificación óptima del mantenimiento y el reemplazo de los cables de izar dentro de una estrategia de mantenimiento predictivo basada en datos.

8.4. Análisis Comparativo de Desempeño

Se realizará un análisis comparativo del desempeño operativo de las tres marcas de cables evaluadas, con el objetivo de determinar cuál presenta mayor eficiencia y confiabilidad bajo condiciones reales de operación.

La evaluación se basará en los indicadores obtenidos directamente de la base de datos histórica, los cuales permiten cuantificar y contrastar el comportamiento de cada tipo de cable:

- Horas trabajadas promedio por marca: representa el tiempo efectivo de operación antes del retiro o falla del cable.
- Toneladas métricas izadas por ciclo: mide la capacidad de carga acumulada en función del rendimiento operativo.
- Frecuencia de fallas por causa: identifica los modos de falla más recurrentes (hebras rotas, rotura completa o límite de tonelaje).

- **Ranking ajustado de desempeño:** establece una jerarquía cuantitativa entre las marcas, considerando simultáneamente confiabilidad, carga soportada y duración operativa.

Este análisis permitirá comparar de manera objetiva la eficiencia global de los cables WRI, BRIDON y PALEX, determinando cuál de ellos ofrece mayor desempeño técnico y menor probabilidad de falla.

Los resultados constituirán una herramienta de apoyo para la toma de decisiones en la selección de proveedores y en la planificación estratégica del mantenimiento predictivo dentro de la operación minera.

8.5. Herramientas utilizadas

Para el desarrollo del análisis estadístico y de simulación se emplearon herramientas informáticas de cálculo y visualización de datos que permitieron procesar, modelar y representar el comportamiento de los cables de izar:

- **Microsoft Excel:** Utilizado para la limpieza, filtrado y organización de la base de datos, así como para el cálculo de indicadores estadísticos y elaboración de tablas de resultados.
- **Microsoft Excel (con complementos de análisis):** Aplicado en el ajuste de distribuciones estadísticas (Weibull, log-normal y exponencial), en el cálculo de parámetros de confiabilidad y en la implementación de la simulación de Montecarlo mediante funciones aleatorias y modelos iterativos.
- **Gráficos de confiabilidad y riesgo:** Generados para visualizar el comportamiento esperado de los cables a lo largo del tiempo, mostrando la evolución de la probabilidad de falla, la función de riesgo $h(t)$ y la confiabilidad $R(t)$ por marca.

Estas herramientas facilitaron la integración del análisis estadístico con la simulación estocástica, permitiendo obtener resultados reproducibles y respaldados por evidencia cuantitativa

8.6. Técnicas de recopilación de datos

La obtención de la información necesaria para el desarrollo del estudio se realizó mediante técnicas de recopilación cuantitativas y cualitativas, orientadas a garantizar la representatividad y validez de los datos analizados.

- Análisis de base de datos histórica de mantenimiento: se revisaron los registros operativos y reportes técnicos correspondientes a fallas, hojas de vida de cables y registros de izaje de palas mineras pertenecientes a una operación a tajo abierto. Esta base de datos constituyó la fuente principal para la estimación de los parámetros de confiabilidad y desempeño.
- Revisión documental técnica: se analizaron manuales de fabricante, procedimientos de mantenimiento interno y la norma ISO 4309:2017, que establece los criterios internacionales para la inspección, mantenimiento y descarte de cables de acero para izaje.
- Entrevistas técnicas no estructuradas (opcional): realizadas con personal especializado en mantenimiento de palas, con el fin de validar las causas comunes de falla, los criterios de reemplazo y las prácticas actuales de intervención.
- Estas técnicas permitieron consolidar una base de información confiable y contextualizada, que sirvió como insumo para el análisis estadístico, la simulación de Montecarlo y la comparación de desempeño entre las distintas marcas de cables.

8.7. Procedimiento

Tabla 1

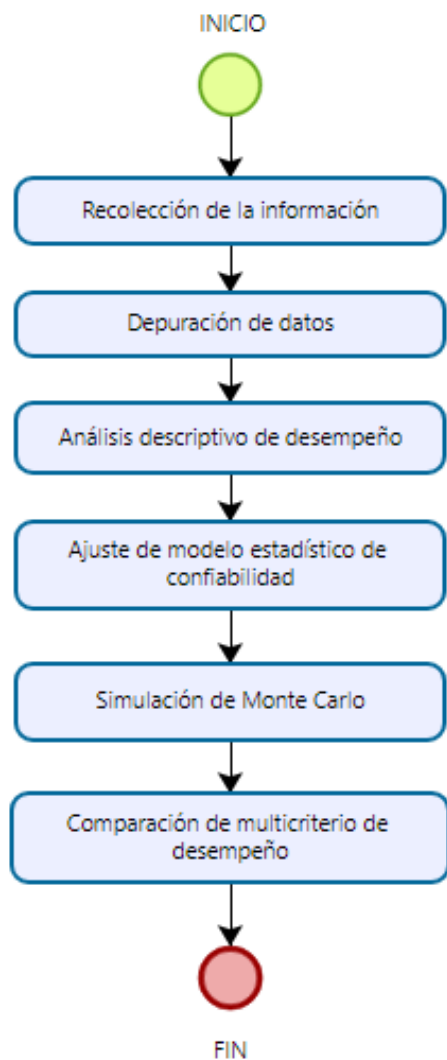
Procedimiento

Paso	Descripción	Resultado esperado
1. Recolección y depuración de datos	Se consolida la información histórica de los cables de izar (WRI, BRIDON y PALEX) a partir de los registros disponibles en formato Excel. Se calcula el tiempo de vida útil en horas y días con base en las fechas de instalación y remoción, eliminando registros incompletos o inconsistentes.	Base de datos estructurada y depurada, lista para el análisis estadístico. Variables clave (horas trabajadas, tonelaje y causa de cambio) preparadas para su procesamiento.
2. Análisis descriptivo de desempeño	Se calculan estadísticas descriptivas por perfil comparativo inicial del marca: promedio de horas trabajadas, desempeño de cada marca de toneladas izadas, frecuencia y tipo de fallas. cable e identificación de Se elaboran gráficos comparativos para tendencias operativas y fallas visualizar tendencias.	Perfil comparativo inicial del marca: promedio de horas trabajadas, desempeño de cada marca de toneladas izadas, frecuencia y tipo de fallas. cable e identificación de Se elaboran gráficos comparativos para tendencias operativas y fallas visualizar tendencias.
3. Ajuste de modelos estadísticos de confiabilidad	Los datos de vida útil se ajustan a distribuciones estadísticas (Weibull, log-normal y exponencial). Se evalúa el nivel de distribución que mejor ajuste mediante pruebas de bondad representa el comportamiento (Kolmogórov–Smirnov, Anderson–Darling y de falla de cada tipo de cable. Chi-cuadrado).	Determinación del modelo de distribución que mejor ajuste mediante pruebas de bondad representa el comportamiento (Kolmogórov–Smirnov, Anderson–Darling y de falla de cada tipo de cable. Chi-cuadrado).
4. Simulación de Montecarlo	Se ejecutan simulaciones con 10,000 iteraciones por marca, utilizando los probabilísticas robustas del parámetros obtenidos del modelo estadístico ajustado. Se estiman cables. Generación de curvas probabilidades acumuladas de falla y vida de confiabilidad y riesgo útil esperada.	Obtención de estimaciones probabilísticas robustas del comportamiento futuro de los cables. Generación de curvas probabilidades acumuladas de falla y vida de confiabilidad y riesgo útil esperada.
5. Comparación multicriterio de desempeño	Se integran métricas clave como MTTF, tasa de falla, toneladas por hora y confiabilidad mejor desempeño proyectada. Se evalúa comparativamente el sustentado en análisis técnico, rendimiento técnico y económico de cada estadístico y de confiabilidad.	Identificación del cable con mejor desempeño integral, sustentado en análisis técnico, rendimiento técnico y económico de cada estadístico y de confiabilidad.

Paso	Descripción	Resultado esperado
6. Conclusiones y recomendaciones	marca.	
	Se interpretan los resultados en función de Documento final con los objetivos planteados. Se formulan propuestas prácticas para recomendaciones para la selección, optimizar la gestión del mantenimiento y reemplazo de cables mantenimiento predictivo y basadas en evidencia cuantitativa.	reducir costos operativos.

Ilustración 1

Diagrama del Flujo del proceso



El diagrama muestra la secuencia metodológica aplicada en el estudio para el análisis de confiabilidad y desempeño de cables de izar utilizados en palas mineras. El proceso inicia con la recolección y depuración de los datos históricos provenientes de registros operativos, asegurando la calidad y coherencia de la información. Posteriormente, se desarrolla un análisis descriptivo de desempeño para identificar tendencias y patrones iniciales, seguido del ajuste de modelos estadísticos de confiabilidad (Weibull, log-normal y exponencial), que permiten caracterizar el comportamiento de falla de cada marca de cable. En la siguiente etapa, se ejecuta la simulación de Montecarlo, la cual genera múltiples escenarios de comportamiento probabilístico para estimar la vida útil y la probabilidad acumulada de falla. Finalmente, se realiza una comparación multicriterio de desempeño, integrando indicadores técnicos y estadísticos (MTTF, tasa de falla y confiabilidad proyectada) con el fin de determinar el cable más eficiente y confiable para la operación minera.

8.8. Herramientas y software

Para el desarrollo del análisis estadístico y la simulación se emplearon herramientas informáticas de uso técnico especializado, que permitieron garantizar la precisión en el tratamiento de datos y la visualización de resultados.

- **Simulación:** se utilizaron plantillas diseñadas en **Microsoft Excel**, programadas con funciones aleatorias y distribuciones estadísticas específicas para la ejecución de la **simulación de Montecarlo**, aplicando entre 1,000 y 10,000 iteraciones por marca de cable.
- **Apoyo en visualización:** se empleó **Microsoft Excel** para la elaboración de gráficos de confiabilidad, curvas de riesgo y representaciones comparativas del comportamiento de los cables, facilitando la interpretación visual de los resultados obtenidos.

Estas herramientas permitieron integrar los procesos de modelado, análisis y presentación de resultados en un entorno unificado, asegurando la trazabilidad y reproducibilidad del estudio.

8.9. Carta Gantt (resumen por fases)

Tabla 2

Carta Gantt (resumen por fases)

Fase	Actividad	Mes 1	Mes 2	Mes 3	Mes 4
1	Revisión bibliográfica y desarrollo del marco teórico	•	•		
2	Recolección, depuración y estructuración de la base de datos		•	•	
3	Análisis estadístico de datos y ajuste de modelos de confiabilidad			•	
4	Simulación de Montecarlo y análisis de resultados			•	•
5	Redacción, interpretación y validación de resultados				•
6	Elaboración de conclusiones y formulación de recomendaciones				•

Nota. La carta Gantt resume las principales fases del proyecto, distribuidas en cuatro meses de ejecución. Cada fase contempla actividades secuenciales orientadas a garantizar la coherencia metodológica, desde la revisión teórica hasta la interpretación final de resultados.

9. Desarrollo del Tema

9.1. Registros históricos de operación y fallas de los cables de izar

9.1.1. Cable WRI - CPU

Equipo	Fecha Instalado	Fecha Removido	Horas Trabajadas	Ton Métricas	Causa Cambio	Ranking Global	Ranking de Falla	ranking ajustado	f(t)	R(t)	ln(t)	ln(-ln(Rt))
S01	24-May-19	28-Jun-19	523.790	1,209,471.330	1	1	1	1.000	0.017	0.983	14.006	-4.096
S04	05-Mar-20	17-Jul-20	396.370	1,482,623.000	1	3	2	2.005	0.040	0.960	14.209	-3.193
S02	01-Oct-19	15-Nov-19	758.810	2,140,266.450	1	4	3	3.010	0.064	0.936	14.576	-2.717
S02	12-Aug-19	01-Oct-19	851.840	2,196,534.030	2	5	4	4.016	0.088	0.912	14.602	-2.389
S01	20-Mar-22	16-May-22	927.380	2,280,637.590	1	6	5	5.021	0.111	0.889	14.640	-2.137
S01	03-Nov-19	26-Dec-19	922.900	2,628,104.000	2	8	6	6.031	0.135	0.865	14.782	-1.929
S02	13-Jun-19	12-Aug-19	1,075.620	2,629,292.900	1	9	7	7.042	0.159	0.841	14.782	-1.753
S04	18-Oct-20	24-Nov-20	674.280	2,680,680.000	1	11	8	8.058	0.183	0.817	14.802	-1.599
S02	31-Jan-21	23-Mar-21	905.650	2,719,447.000	1	13	9	9.079	0.207	0.793	14.816	-1.461
S01	02-Feb-21	28-Mar-21	884.730	2,743,012.000	2	14	10	10.101	0.231	0.769	14.825	-1.336
S04	17-Jul-20	31-Aug-20	669.320	2,746,275.000	1	15	11	11.122	0.255	0.745	14.826	-1.222
S01	13-Nov-21	07-Jan-22	863.960	2,785,341.940	2	17	12	12.150	0.279	0.721	14.840	-1.115
S01	07-Jul-20	02-Sep-20	810.790	2,797,820.000	1	19	13	13.183	0.304	0.696	14.844	-1.016
S02	21-Apr-25	21-Jun-25	1,028.050	2,799,073.000	2	20	14	14.216	0.328	0.672	14.845	-0.922
S02	21-Jun-20	23-Aug-20	893.510	2,865,455.000	2	23	15	15.261	0.353	0.647	14.868	-0.832
S02	03-Dec-20	31-Jan-21	990.560	2,945,690.000	2	33	16	16.363	0.379	0.621	14.896	-0.742
S04	02-Feb-19	21-Mar-19	847.130	3,068,320.940	1	43	17	17.531	0.406	0.594	14.937	-0.651

Causa de cambio

1. Hebras Rotas
2. Rotura de Cable

Se analizaron 17 registros históricos de operación de **cables de izaje marca WRI-CPU**, utilizados en equipos de minería de tajo abierto. Los datos analizados incluyeron:

- **Horas trabajadas** antes del retiro: entre 396 y 1,075 horas.
- **Tonelaje izado acumulado**: más de 3 millones de toneladas en algunos casos.
- **Causas de cambio**: principalmente “Hebras rotas” y “Rotura de cable”.
- **Ranking de falla**: utilizado para estructurar los datos y aplicar funciones estadísticas como la confiabilidad $R(t)$, función de densidad $f(t)$ y función de riesgo $h(t)$.

Estos datos fueron depurados, clasificados y transformados para su análisis estadístico posterior.

9.1.2. Cable Bridon

Equipo	Fecha Instalado	Fecha Removido	Horas Trabajadas	Ton Métricas	Causa Cambio	Ranking Global	Ranking de Falla	ranking ajustado	$f(t)$	$R(t)$	$\ln(t)$	$\ln(-\ln(Rt))$
S04	28-Dec-23	15-Jan-24	320.6	1,122,680.0	1	1	1	1	0.01	0.99	13.93	-4.50
S02	14-May-18	24-Jun-18	715.9	1,317,005.7	1	2	2	2	0.03	0.97	14.09	-3.61
S02	28-Aug-18	12-Oct-18	777.1	1,352,508.1	1	3	3	3	0.04	0.96	14.12	-3.13
S04	10-Jan-23	09-Feb-23	487.1	1,561,037.9	1	4	4	4	0.06	0.94	14.26	-2.81
S04	20-Feb-25	21-Mar-25	525.2	1,637,028.0	2	5	5	5	0.07	0.93	14.31	-2.56
S01	20-Jan-25	05-Mar-25	655.1	1,662,964.0	2	6	6	6	0.09	0.91	14.32	-2.36
S04	21-Mar-25	29-Apr-25	679.6	1,702,619.0	1	7	7	7	0.11	0.89	14.35	-2.19
S01	05-Mar-25	03-Apr-25	543.7	1,730,273.0	2	8	8	8	0.12	0.88	14.36	-2.04
S04	24-Jun-18	19-Jul-18	458.1	1,747,718.5	1	9	9	9	0.14	0.86	14.37	-1.91
S04	18-Aug-23	22-Sep-23	651.2	1,797,158.3	1	10	10	10	0.15	0.85	14.40	-1.80
S02	29-Sep-23	22-Oct-23	417.7	1,804,909.0	2	11	11	11	0.17	0.83	14.41	-1.69
S02	25-Jul-23	15-Aug-23	401.0	1,811,952.0	1	12	12	12	0.18	0.82	14.41	-1.59
S01	10-Dec-22	14-Jan-23	597.7	1,815,881.4	2	13	13	13	0.20	0.80	14.41	-1.50
S02	24-Jun-18	28-Aug-18	1,042.5	1,848,811.7	1	14	14	14	0.22	0.78	14.43	-1.41
S02	30-May-23	21-Jun-23	397.1	1,890,866.0	1	15	15	15	0.23	0.77	14.45	-1.33

S02	05-Sep-23	29-Sep-23	432.8	1,894,275.0	1	16	16	16	0.25	0.75	14.45	-1.26
S04	17-Nov-24	30-Dec-24	704.3	1,896,344.0	2	17	17	17	0.26	0.74	14.46	-1.19
S01	18-Apr-18	17-Jun-18	861.0	2,034,632.4	2	18	18	18	0.28	0.72	14.53	-1.12
S02	11-Mar-25	21-Apr-25	777.1	2,051,014.0	2	19	19	19	0.29	0.71	14.53	-1.05
S01	04-Mar-23	14-Apr-23	727.4	2,052,424.3	1	20	20	20	0.31	0.69	14.53	-0.99
S04	29-Apr-25	09-Jun-25	726.4	2,065,691.0	1	21	21	21	0.33	0.67	14.54	-0.93
S01	02-Nov-22	10-Dec-22	695.9	2,099,068.6	1	22	22	22	0.34	0.66	14.56	-0.87
S01	29-Sep-22	02-Nov-22	618.4	2,126,705.6	1	23	23	23	0.36	0.64	14.57	-0.81
S04	05-Dec-22	10-Jan-23	654.9	2,212,450.3	1	24	24	24	0.37	0.63	14.61	-0.76
S04	19-Jul-18	22-Aug-18	600.3	2,243,889.2	1	25	25	25	0.39	0.61	14.62	-0.71
S01	11-Mar-17	02-May-17	875.4	2,298,792.6	1	26	26	26	0.41	0.59	14.65	-0.65
S01	14-Jul-23	25-Aug-23	773.9	2,301,940.2	1	27	27	27	0.42	0.58	14.65	-0.60
S02	12-Oct-18	28-Dec-18	1,328.1	2,367,780.2	1	28	28	28	0.44	0.56	14.68	-0.55
S01	13-May-25	14-Jun-25	581.5	2,400,292.0	1	29	29	29	0.45	0.55	14.69	-0.51
S02	11-Jun-22	18-Jul-22	716.3	2,439,067.2	1	31	30	30	0.47	0.53	14.71	-0.46
S01	25-Aug-23	08-Oct-23	783.4	2,456,500.0	1	33	31	31	0.49	0.51	14.71	-0.40
S04	27-Jun-23	18-Aug-23	969.4	2,583,897.0	1	36	32	32	0.50	0.50	14.76	-0.36
S04	05-Jul-24	11-Sep-24	1,157.4	2,589,131.0	1	37	33	33	0.52	0.48	14.77	-0.31
S04	08-May-24	05-Jul-24	1,062.7	2,590,237.0	1	38	34	34	0.54	0.46	14.77	-0.26
S04	30-Dec-24	20-Feb-25	879.8	2,618,551.0	1	41	35	35	0.55	0.45	14.78	-0.22
S01	15-May-22	05-Jul-22	936.8	2,703,728.3	1	45	36	36	0.57	0.43	14.81	-0.17
S01	17-Oct-24	01-Dec-24	762.1	2,708,669.0	2	47	37	37	0.59	0.41	14.81	-0.13
S01	28-Jun-19	27-Aug-19	1,005.0	2,782,110.0	1	51	38	38	0.60	0.40	14.84	-0.08
S04	22-Sep-23	12-Nov-23	945.9	2,844,592.4	1	57	39	39	0.62	0.38	14.86	-0.03
S01	08-May-24	14-Jun-24	696.1	2,874,209.0	1	61	40	40	0.64	0.36	14.87	0.02
S02	21-Jun-23	25-Jul-23	626.1	2,932,095.0	1	63	41	41	0.66	0.34	14.89	0.07

Se analizaron **41 registros históricos de operación** de cables de izaje **marca BRIDON**, utilizados en equipos de minería a tajo abierto. El propósito fue evaluar su desempeño operativo y estimar su confiabilidad a través del análisis estadístico.

Los datos analizados incluyeron:

- **Horas trabajadas antes del retiro:** entre **320 y 1,328 horas**, abarcando una amplia gama de condiciones operativas.
- **Tonelaje izado acumulado:** con valores superiores a **2.9 millones de toneladas métricas** en los casos de mayor uso.

- **Causas de cambio:** se clasificaron principalmente en “**Hebras rotas**” y “**Rotura de cable**”, lo cual permitió distinguir patrones de falla por desgaste progresivo o fallas críticas.
- **Ranking de falla:** se utilizó para organizar cronológicamente los eventos de retiro y aplicar funciones estadísticas como la **función de confiabilidad $R(t)$** , la **función de densidad de falla $f(t)$** y la **función de riesgo $h(t)$** (representada por $\ln(-\ln(R(t)))$).

Todos los registros fueron **depurados, organizados y transformados** para permitir el ajuste a la distribución de Weibull, facilitando así el análisis de confiabilidad y posterior simulación de fallas mediante el método de Montecarlo.

9.1.3. Cable Palex

Se analizaron **27 registros históricos de operación** de cables de izaje **marca PALEX**, empleados en equipos de minería de tajo abierto. El objetivo fue evaluar su desempeño y determinar su comportamiento de falla a partir del análisis estadístico.

Los datos evaluados incluyeron:

- **Horas trabajadas antes del retiro:** con valores comprendidos entre **464 y 1,028 horas**, reflejando diversas condiciones operativas.
- **Tonelaje izado acumulado:** se observaron cargas de hasta **2.6 millones de toneladas métricas**, lo que pone en evidencia la intensidad de uso a la que fueron sometidos los cables.
- **Causas de cambio:** se identificaron principalmente dos categorías: “**Hebras rotas**” y “**Rotura de cable**”, siendo esta última más frecuente en los registros analizados.
- **Ranking de falla:** los datos fueron organizados y clasificados cronológicamente utilizando un sistema de ranking ajustado, lo que permitió aplicar funciones estadísticas como la **función de confiabilidad $R(t)$** , **función de densidad $f(t)$** y **función de riesgo $h(t)$** (representada por $\ln(-\ln(R(t)))$).

Estas transformaciones fueron esenciales para ajustar los datos a una distribución de Weibull, lo que facilitará su posterior uso en la **simulación de Montecarlo**, orientada a la optimización del mantenimiento preventivo y correctivo de los cables.

Equipo	Fecha Instalado	Fecha Removido	Horas Trabajadas	Ton Métricas	Causa Cambio	Ranking Global	Ranking de Falla	ranking ajustado	f(t)	R(t)	ln(t)	ln(-ln(Rt))
S01	01-Nov-16	02-Dec-16	582.6	1,475,031.5	2	1	1	1	0.01	0.99	14.20	-4.59
S01	30-Jan-17	11-Mar-17	718.8	1,533,241.1	1	2	2	2	0.02	0.98	14.24	-3.70
S01	26-Dec-18	12-Feb-19	700.4	1,803,013.9	1	3	3	3	0.04	0.96	14.40	-3.23
S01	31-Jul-16	03-Sep-16	617.5	1,869,218.6	1	5	4	4	0.05	0.95	14.44	-2.90
S01	03-Nov-18	26-Dec-18	817.8	1,882,746.9	1	6	5	5	0.07	0.93	14.45	-2.66
S01	29-Dec-17	06-Feb-18	684.8	1,976,885.3	1	9	6	6	0.08	0.92	14.50	-2.45
S02	10-Dec-14	17-Jan-15	740.8	1,994,998.5	2	10	7	7	0.10	0.90	14.51	-2.28
S02	13-Jul-16	01-Sep-16	863.8	2,000,762.0	2	11	8	8	0.11	0.89	14.51	-2.13
S01	03-May-16	11-Jun-16	710.3	2,058,999.4	2	12	9	9	0.13	0.87	14.54	-2.00
S01	04-Jun-23	14-Jul-23	714.3	2,141,452.3	1	21	10	10	0.14	0.86	14.58	-1.88
S04	05-Jan-18	03-Feb-18	511.3	2,141,820.9	1	22	11	11	0.16	0.84	14.58	-1.77
S02	30-Mar-23	26-Apr-23	484.6	2,167,759.0	1	25	12	12	0.17	0.83	14.59	-1.66
S01	18-Sep-16	01-Nov-16	780.0	2,169,672.7	2	26	13	13	0.19	0.81	14.59	-1.57
S02	02-Mar-23	30-Mar-23	464.3	2,214,799.0	1	29	14	14	0.20	0.80	14.61	-1.48
S04	05-Apr-17	16-May-17	523.6	2,249,459.9	1	30	15	15	0.22	0.78	14.63	-1.40
S04	09-Feb-23	25-Mar-23	781.4	2,266,497.8	1	32	16	16	0.24	0.76	14.63	-1.32
S04	15-May-23	27-Jun-23	778.3	2,269,532.0	1	33	17	17	0.25	0.75	14.64	-1.24
S01	14-Apr-23	04-Jun-23	839.8	2,322,059.3	1	35	18	18	0.27	0.73	14.66	-1.17
S04	25-Mar-23	15-May-23	890.2	2,460,377.5	1	43	19	19	0.28	0.72	14.72	-1.10
S04	19-Jan-17	27-Feb-17	623.8	2,492,755.2	2	46	20	21	0.30	0.70	14.73	-1.03
S01	22-Jan-15	18-Mar-15	1,028.2	2,499,685.0	2	47	21	22	0.32	0.68	14.73	-0.96
S04	25-Jul-16	27-Aug-16	635.1	2,516,194.6	2	48	22	23	0.33	0.67	14.74	-0.90
S04	18-Dec-16	19-Jan-17	606.8	2,556,172.7	2	49	23	24	0.35	0.65	14.75	-0.84
S01	14-Jan-23	04-Mar-23	864.5	2,572,862.4	1	50	24	25	0.37	0.63	14.76	-0.78
S04	27-Feb-17	05-Apr-17	662.6	2,643,110.6	2	55	25	27	0.38	0.62	14.79	-0.72
S04	14-Mar-15	22-Apr-15	730.4	2,679,056.5	1	57	26	28	0.40	0.60	14.80	-0.66
S04	16-Sep-15	18-Oct-15	615.4	2,685,102.3	2	59	27	29	0.42	0.58	14.80	-0.61

9.2. Distribución estadística que mejor se ajusta al comportamiento de fallas de cada tipo de cable

9.2.1. Cable WRI - CPU

Se aplicó la transformación lineal de la función de confiabilidad Weibull:

$$\ln [-\ln (R(t))] = \beta \cdot \ln(t) - \beta \cdot \ln(\eta)$$

Usando los datos transformados ($\ln(t)$ y $\ln(-\ln(R(t)))$), se generó el gráfico de probabilidad Weibull, obteniéndose una alta linealidad con un coeficiente de determinación de:

$$R^2 = 0.909,$$

$$\text{Pendiente } (\beta) = 3.6072,$$

$$\text{Intercepto} = -54.78$$

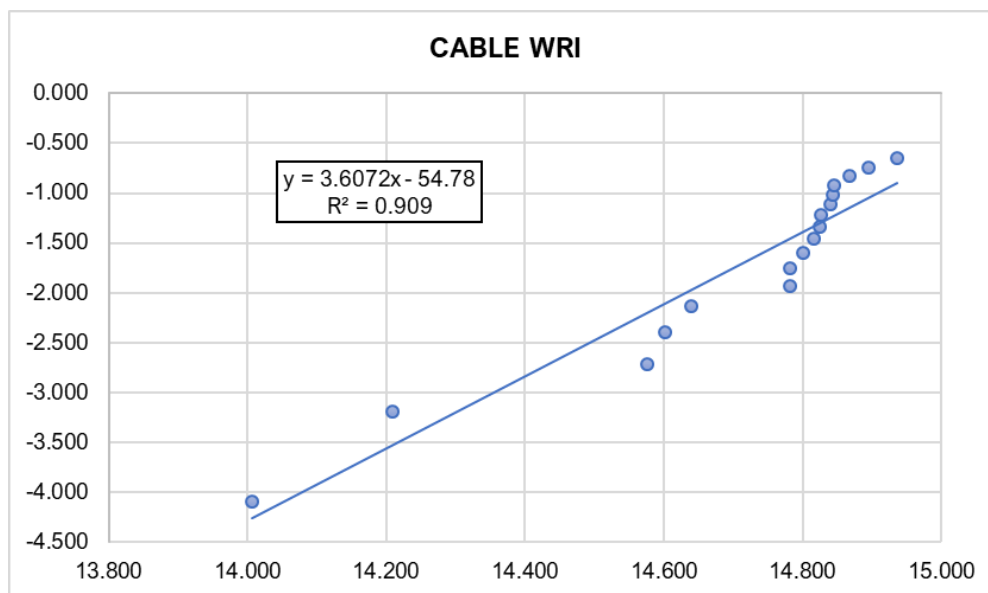
Interpretación:

$\beta > 1$ (3.6072) $\rightarrow$ El cable experimenta una tasa de falla creciente, lo cual es consistente con procesos de desgaste por fatiga.

La alta R^2 indica que los datos se ajustan bien a una distribución Weibull.

El modelo puede ser utilizado para predecir confiabilidad, riesgo y vida útil esperada de cables similares bajo condiciones comparables.

En conclusión: La distribución de Weibull es la más adecuada para modelar las fallas observadas en los cables WRI.



9.2.2. Cable Bridon

Para los cables de izaje **marca BRIDON**, se realizó un análisis de regresión lineal basado en la transformación de Weibull, empleando el método gráfico sobre los datos transformados mediante las funciones $\ln(t)$ y $\ln(-\ln(R(t)))$. Esta metodología permitió evaluar la bondad del ajuste y determinar los parámetros de la distribución.

La ecuación de la recta ajustada fue:

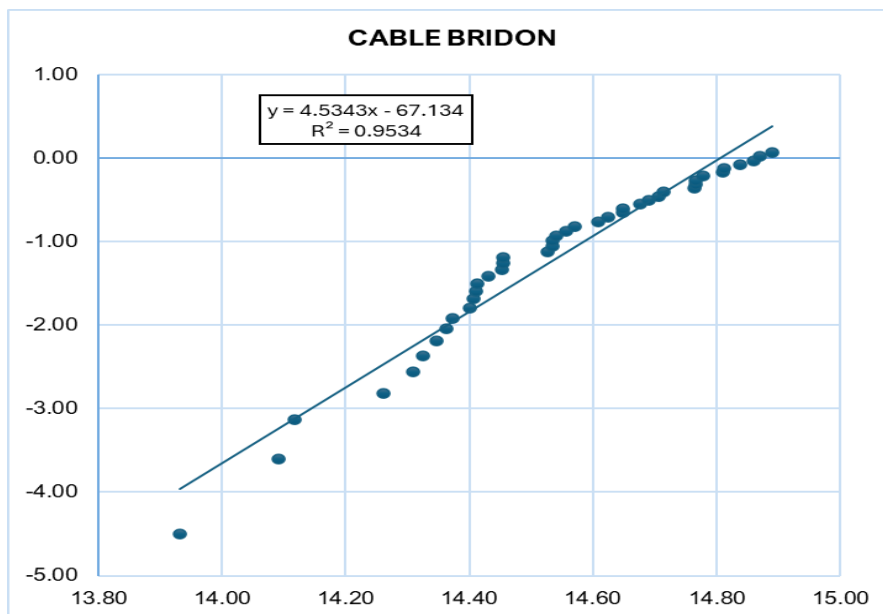
$$y = 4.5343x - 67.134,$$

con un coeficiente de determinación $R^2 = 0.9534$, lo que indica un ajuste **muy adecuado** del modelo de Weibull a los datos observados.

A partir de esta recta se identificaron los siguientes **parámetros de la distribución de Weibull**:

- **β (forma):** 4.5343 (Este valor elevado indica que el riesgo de falla **aumenta con el tiempo**, típico de un comportamiento por desgaste).
- **η (escala):** $e^{(-67.134 / 4.5343)} \approx 14.08$ (en escala logarítmica de tiempo)

La alta correlación lineal y la forma de la curva indican que los cables BRIDON presentan un comportamiento confiable durante una gran parte de su vida útil, pero luego entran en una fase de falla por desgaste acelerado. Este patrón justifica la aplicación de **estrategias de mantenimiento preventivo** basadas en monitoreo por horas acumuladas o tonelaje izado.



9.2.3. Cable Palex

En el caso de los cables de izaje **marca PALEX**, se aplicó el método gráfico de Weibull transformando los datos mediante las funciones naturales $\ln(t)$ y $\ln(-\ln(R(t)))$. Esta transformación permitió evaluar visualmente el ajuste de los datos a la distribución Weibull, así como estimar los parámetros característicos del modelo de confiabilidad.

La ecuación de regresión lineal obtenida fue:

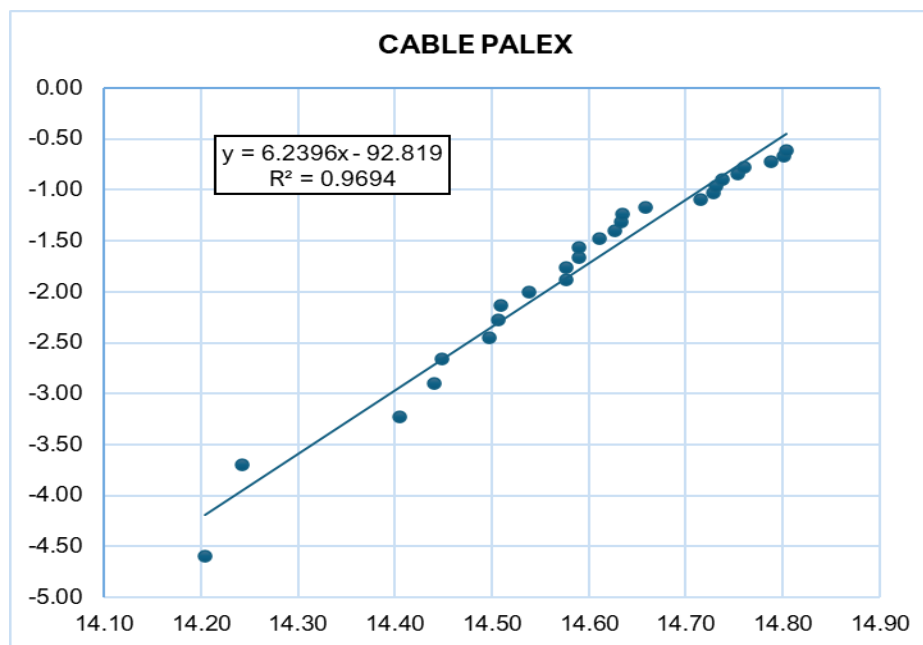
$$y = 6.2396x - 92.819,$$

con un coeficiente de determinación $R^2 = 0.9694$, lo que evidencia un **excelente ajuste** a la distribución de Weibull.

Con base en esta ecuación, se estiman los siguientes parámetros del modelo:

- **β (forma):** 6.2396 (Un valor alto que indica un proceso de desgaste acelerado; la probabilidad de falla aumenta significativamente con el tiempo).
- **η (escala):** $e^{(-92.819 / 6.2396)} \approx 13.91$ (en unidades logarítmicas de tiempo)

El alto valor de β sugiere que los cables PALEX entran rápidamente en la fase de desgaste, siendo propensos a fallas después de un cierto umbral de horas trabajadas o tonelaje izado. Este comportamiento hace indispensable implementar **estrategias de mantenimiento predictivo**, basadas en análisis estadísticos de confiabilidad, para evitar fallas súbitas que comprometan la operación minera.



9.3. Simulación de Montecarlo

9.3.1. Cable WRI - CPU

A partir de los parámetros estadísticos obtenidos del ajuste de la distribución de Weibull ($\beta = 3.60$; MTBF $\approx 3,178,000$ toneladas métricas), se desarrolló una simulación Monte Carlo para evaluar el comportamiento del cable WRI bajo condiciones operativas reales.

La simulación se ejecutó con 1,000 iteraciones, generando números aleatorios transformados en tiempos entre fallas (TBF) mediante la función inversa de Weibull. Cada TBF se convirtió a horas efectivas considerando la tasa promedio de producción y la disponibilidad operacional, permitiendo proyectar la frecuencia mensual de recambio de cables y las probabilidades de ocurrencia durante un horizonte de un año.

	aleatorio	TBF	Horas
1	0.1	4,241,215.9	1,253.7
2	0.2	3,908,137.7	1,155.2
3	0.6	3,041,264.7	899.0
4	0.7	2,626,601.5	776.4
5	0.4	3,491,602.4	1,032.1
6	1.0	1,403,822.2	415.0
7	0.6	2,898,466.9	856.8
8	0.5	3,292,644.6	973.3
9	0.1	4,256,929.8	1,258.3
10	0.5	3,125,235.1	923.8
11	0.8	2,351,660.8	695.1
12	0.7	2,532,971.8	748.7
13	0.9	1,908,444.7	564.1
14	0.4	3,584,312.8	1,059.5
15	0.2	3,976,068.6	1,175.3
16	0.3	3,837,640.0	1,134.4
17	0.7	2,729,735.8	806.9

Fecha	Cambio de Mes
07/03/2025	01/01/2025
07/05/2025	01/02/2025
24/06/2025	02/02/2025
03/08/2025	03/02/2025
27/09/2025	04/02/2025
19/10/2025	05/02/2025
03/12/2025	06/02/2025
23/01/2026	07/02/2025
30/03/2026	08/02/2025
18/05/2026	09/02/2025
23/06/2026	10/02/2025
02/08/2026	11/02/2025
31/08/2026	12/02/2025
26/10/2026	13/02/2025
27/12/2026	14/02/2025
25/02/2027	15/02/2025
08/04/2027	16/02/2025

Fechas	Cambio	Mes	año
01/01/2025	Cambio de mes	1	2025
01/01/2025	Cambio de mes	1	2025
01/02/2025	Cambio de mes	2	2025
02/02/2025	Cambio de mes	2	2025
03/02/2025	Cambio de mes	2	2025
04/02/2025	Cambio de mes	2	2025
05/02/2025	Cambio de mes	2	2025
06/02/2025	Cambio de mes	2	2025
07/02/2025	Cambio de mes	2	2025
08/02/2025	Cambio de mes	2	2025
09/02/2025	Cambio de mes	2	2025
10/02/2025	Cambio de mes	2	2025
11/02/2025	Cambio de mes	2	2025
11/02/2025	cambio de cable	2	2025
12/02/2025	Cambio de mes	2	2025
13/02/2025	Cambio de mes	2	2025
14/02/2025	Cambio de mes	2	2025
15/02/2025	Cambio de mes	2	2025
16/02/2025	Cambio de mes	2	2025
17/02/2025	Cambio de mes	2	2025
18/02/2025	Cambio de mes	2	2025
19/02/2025	Cambio de mes	2	2025
20/02/2025	Cambio de mes	2	2025
21/02/2025	Cambio de mes	2	2025
22/02/2025	Cambio de mes	2	2025
23/02/2025	Cambio de mes	2	2025
24/02/2025	Cambio de mes	2	2025
25/02/2025	Cambio de mes	2	2025
26/02/2025	Cambio de mes	2	2025
27/02/2025	Cambio de mes	2	2025

Se obtiene los siguientes datos de probabilidades

Mes	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2025	0	1	0	1	0	1	1	1	0	1	0	1

Mes	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Probabilidades Falla	18%	64%	55%	54%	64%	56%	67%	57%	57%	66%	55%	56%

9.3.2. Cable BRIDON

A partir de los parámetros estadísticos obtenidos del ajuste de la distribución de Weibull ($\beta = 4.53$; MTBF $\approx 2,457,775.95$ toneladas métricas), se realizó una simulación de Montecarlo que permite evaluar el comportamiento del cable BRIDON bajo condiciones operativas reales en una estimación a un año el comportamiento de cambio de cables por mes y probabilidades de cambio con una simulación de 1000 datos

	aleatorio	TBF	Horas
1	0.1	3,160,579.2	934.3
2	0.8	1,830,802.9	541.2
3	0.1	3,398,053.5	1,004.4
4	0.3	2,887,521.0	853.5
5	0.5	2,428,843.0	718.0
6	0.4	2,714,407.8	802.4
7	0.0	3,639,456.6	1,075.8
8	0.9	1,475,051.7	436.0
9	0.9	1,514,671.9	447.7
10	0.3	2,882,307.7	852.0
11	0.7	2,050,347.9	606.1
12	0.5	2,447,240.0	723.4
13	0.7	2,151,614.7	636.0
14	0.1	3,260,506.6	963.8
15	0.0	3,803,321.5	1,124.2
16	0.4	2,627,021.3	776.5

Fecha	Cambio de Mes
19/02/2025	01/01/2025
19/03/2025	01/02/2025
11/05/2025	02/02/2025
25/06/2025	03/02/2025
02/08/2025	04/02/2025
13/09/2025	05/02/2025
09/11/2025	06/02/2025
02/12/2025	07/02/2025
25/12/2025	08/02/2025
08/02/2026	09/02/2025
12/03/2026	10/02/2025
19/04/2026	11/02/2025
22/05/2026	12/02/2025
12/07/2026	13/02/2025
09/09/2026	14/02/2025
20/10/2026	15/02/2025

	Cambio	Mes	año
01/01/2025	Cambio de mes	1	2025
01/01/2025	Cambio de mes	1	2025
01/02/2025	Cambio de mes	2	2025
02/02/2025	Cambio de mes	2	2025
03/02/2025	Cambio de mes	2	2025
04/02/2025	Cambio de mes	2	2025
05/02/2025	Cambio de mes	2	2025
06/02/2025	Cambio de mes	2	2025
07/02/2025	Cambio de mes	2	2025
08/02/2025	Cambio de mes	2	2025
09/02/2025	Cambio de mes	2	2025
10/02/2025	Cambio de mes	2	2025
11/02/2025	Cambio de mes	2	2025
12/02/2025	Cambio de mes	2	2025
13/02/2025	Cambio de mes	2	2025
14/02/2025	Cambio de mes	2	2025
15/02/2025	Cambio de mes	2	2025
16/02/2025	Cambio de mes	2	2025
17/02/2025	Cambio de mes	2	2025
18/02/2025	Cambio de mes	2	2025
19/02/2025	Cambio de mes	2	2025
19/02/2025	cambio de cable	2	2025
20/02/2025	Cambio de mes	2	2025
21/02/2025	Cambio de mes	2	2025
22/02/2025	Cambio de mes	2	2025
23/02/2025	Cambio de mes	2	2025
24/02/2025	Cambio de mes	2	2025
25/02/2025	Cambio de mes	2	2025
26/02/2025	Cambio de mes	2	2025
27/02/2025	Cambio de mes	2	2025
28/02/2025	Cambio de mes	2	2025

Mes	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2025	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
9%	91%	65%	62%	77%	71%	68%	73%	70%	70%	69%	73%

9.3.3. Cable PALEX

El cable PALEX presentó un ajuste Weibull con parámetros $\beta = 6.23$ y MTBF $\approx 2,746,282$ toneladas métricas, indicando una baja dispersión y alta confiabilidad.

La simulación Monte Carlo, aplicada con 1,000 iteraciones, permitió estimar el patrón de reemplazos y las probabilidades de falla mensual para el año base.

Simulemos comportamiento de vida			
	aleatorio	TBF	Horas
1	0.3	3,109,752.0	919.2
2	0.0	3,613,831.8	1,068.2
3	0.2	3,262,631.6	964.4
4	0.7	2,522,691.0	745.7
5	0.6	2,651,715.6	783.8
6	0.2	3,166,263.5	935.9
7	0.2	3,115,512.3	920.9
8	0.2	3,123,829.3	923.4
9	0.9	1,918,667.6	567.1
10	1.0	1,629,721.3	481.7
11	0.1	3,403,193.3	1,006.0
12	0.8	2,285,870.2	675.7
13	0.5	2,750,890.0	813.2
14	0.4	2,903,603.4	858.3
15	0.8	2,271,999.2	671.6
16	1.0	1,403,862.9	415.0

Fecha	Cambio de Mes
18/02/2025	01/01/2025
15/04/2025	01/02/2025
05/06/2025	02/02/2025
14/07/2025	03/02/2025
24/08/2025	04/02/2025
13/10/2025	05/02/2025
30/11/2025	06/02/2025
18/01/2026	07/02/2025
17/02/2026	08/02/2025
14/03/2026	09/02/2025
06/05/2026	10/02/2025
10/06/2026	11/02/2025
23/07/2026	12/02/2025
06/09/2026	13/02/2025
12/10/2026	14/02/2025
03/11/2026	15/02/2025

Fechas	Cambio	Mes	año
01/01/2025	Cambio de mes	1	2025
01/01/2025	Cambio de mes	1	2025
30/01/2025	cambio de cable	1	2025
01/02/2025	Cambio de mes	2	2025
02/02/2025	Cambio de mes	2	2025
03/02/2025	Cambio de mes	2	2025
04/02/2025	Cambio de mes	2	2025
05/02/2025	Cambio de mes	2	2025
06/02/2025	Cambio de mes	2	2025
07/02/2025	Cambio de mes	2	2025
08/02/2025	Cambio de mes	2	2025
09/02/2025	Cambio de mes	2	2025
10/02/2025	Cambio de mes	2	2025
11/02/2025	Cambio de mes	2	2025
12/02/2025	Cambio de mes	2	2025
13/02/2025	Cambio de mes	2	2025
14/02/2025	Cambio de mes	2	2025
15/02/2025	Cambio de mes	2	2025
16/02/2025	Cambio de mes	2	2025
17/02/2025	Cambio de mes	2	2025
18/02/2025	Cambio de mes	2	2025

Mes	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2025	0	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
9%	91%	65%	62%	77%	71%	68%	73%	70%	70%	69%	73%

9.4. Análisis económico del mantenimiento

9.4.1. Cables de izaje marca WRI-CPU

A partir del análisis de confiabilidad y del desempeño del cable WRI-CPU, se evaluaron dos escenarios de mantenimiento teniendo en cuenta los siguientes datos:

Costo	Mantenimiento Preventivo		Mantenimiento Correctivo
Costo cable	\$ 33,854.00		\$ 36,918.52
Costo de mano de hora	\$ 1,296.00		\$ 1,900.00
CI	\$ 458,260.00		\$ 708,220.00
TOTAL	\$ 493,410.00		\$ 747,038.52

El resultado del análisis económico permite identificar el punto de mínima intersección entre los costos preventivos y correctivos, es decir, el punto de reemplazo económico. El punto óptimo de intervención para el cable WRI-CPU se presenta a las 2,298,848.2 toneladas métricas, con un costo equivalente mínimo (E_c) de 196.8 USD/h. En este punto se obtienen los siguientes indicadores:

Parámetro	Valor
R(t)	0.8100
F(t)	0.1900
Costo de intervención promedio	541,587.6 USD
MTTRt	12,139.7 t
MTBFt	101,227.9 t
MTBMt	1,881,402.4 t
E_c preventivo	145.2 USD/h
E_c correctivo	51.6 USD/h
Disponibilidad técnica (A_t)	99.4 %
Presupuesto anual estimado	\$ 7,557,587.4

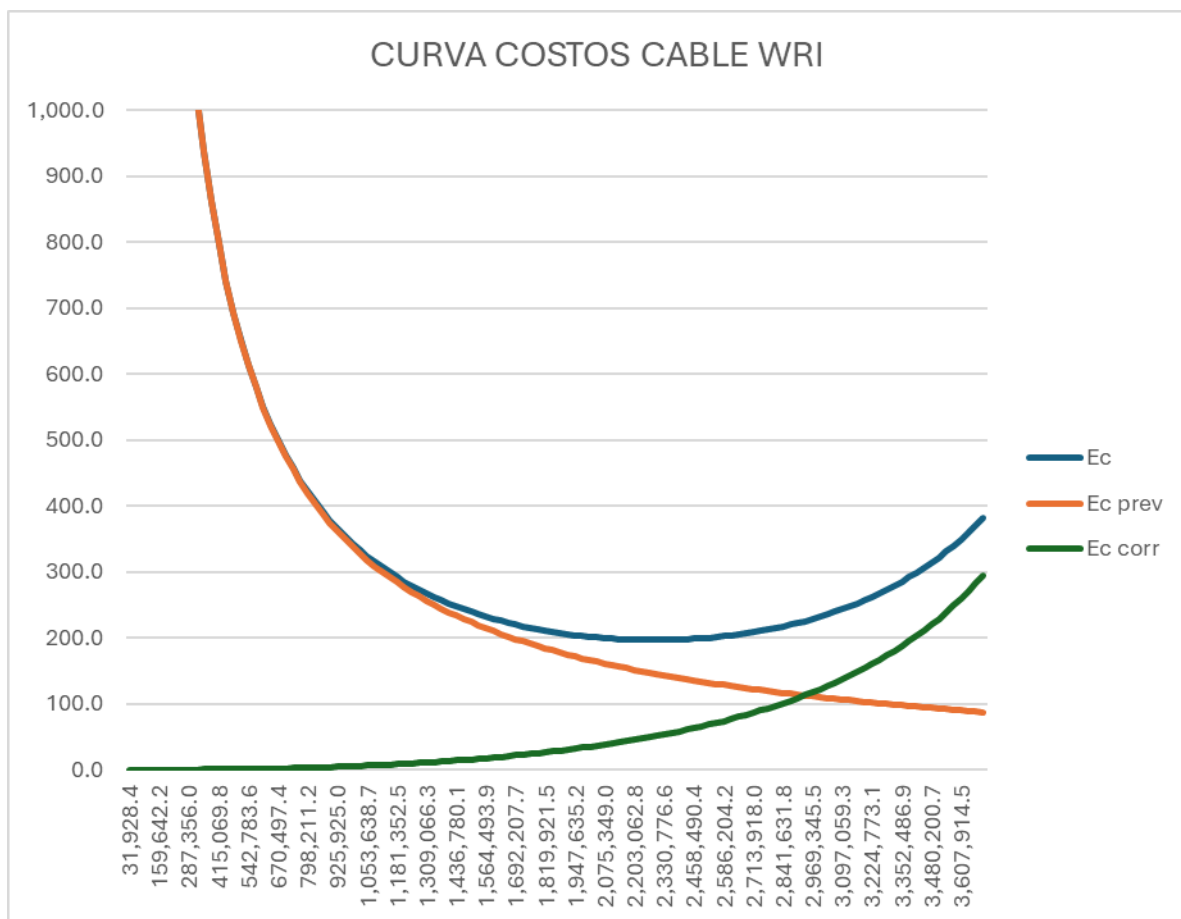


Fig 5.4.1 Curva de costos de mantenimiento – WRI-CPU

9.4.2. Cable Bridon

A partir del análisis de confiabilidad y del desempeño del cable BRIDON, se evaluaron dos escenarios de mantenimiento teniendo en cuenta los siguientes datos:

Costo	Mantenimiento Preventivo		Mantenimiento Correctivo
Costo cable	\$ 36,918.52		\$ 36,918.52
Costo de mano de hora	\$ 1,296.00		\$ 1,900.00
CI	\$ 458,260.00		\$ 708,220.00
TOTAL	\$ 496,474.52		\$ 747,038.52

El resultado del análisis económico muestra que el punto óptimo de intervención para el cable BRIDON se encuentra a las 1,720,443.2 toneladas métricas, con un costo equivalente mínimo (E_c) de 236.7 USD/h. En dicho punto se registran los siguientes valores:

Parámetro	Valor
R(t)	0.8769
F(t)	0.1231
Costo de intervención promedio	527,310.1 USD
MTTRt	11,738.4 t
MTBFt	101,378.0 t
MTBMt	1,521,193.2 t
E_c preventivo	195.4 USD/h
E_c correctivo	41.3 USD/h
Disponibilidad técnica (A_t)	99.2 %
Presupuesto anual estimado	\$ 9,089,348.9

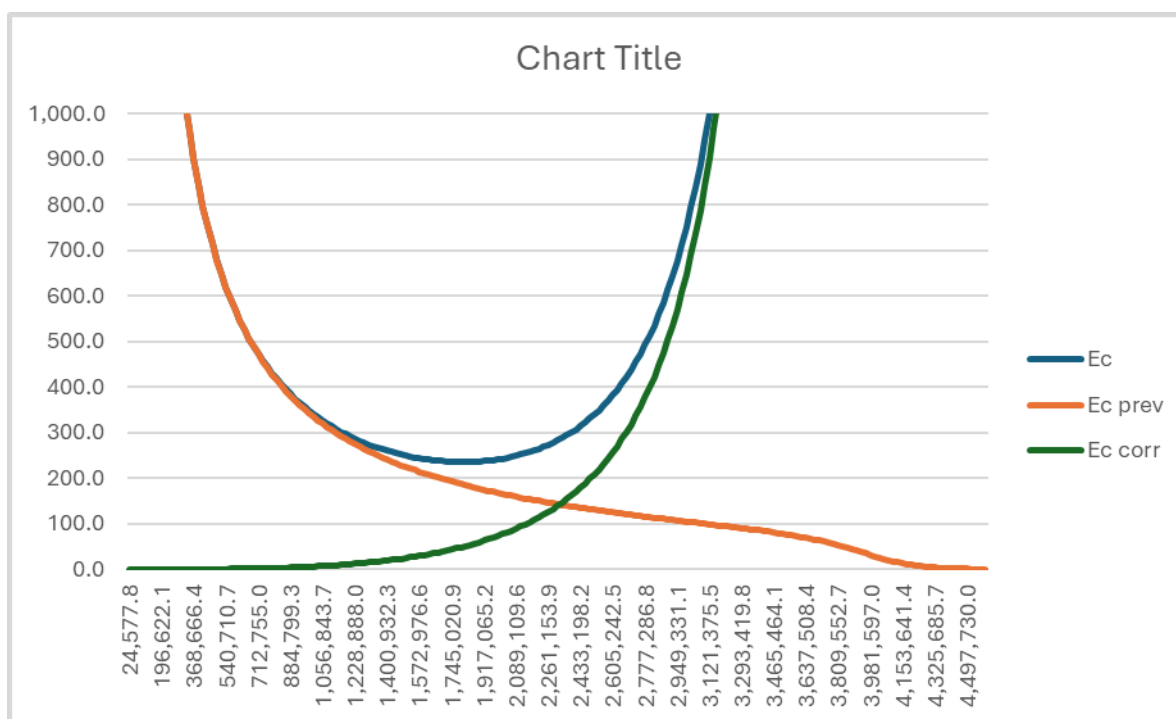


Fig. 5.42 Curva de costos de mantenimiento – BRIDON

9.4.3. Cable Palex

A partir del análisis de confiabilidad y del desempeño del cable PALEX, se evaluaron dos escenarios de mantenimiento teniendo en cuenta los siguientes datos:

Costo	Mantenimiento Preventivo		Mantenimiento Correctivo
Costo cable	\$ 36,328.52		\$ 36,328.52
Costo de mano de hora	\$ 1,296.00		\$ 1,900.00
CI	\$ 458,260.00		\$ 708,220.00
TOTAL	\$ 495,884.52		\$ 746,448.52

El análisis de costos permitió determinar que el punto óptimo de reemplazo para el cable PALEX se presenta a las 2,142,099.8 toneladas métricas, con un costo equivalente mínimo (E_c) de 190.7 USD/h. En este punto se obtienen los siguientes resultados:

Parámetro	Valor
R(t)	0.8737
F(t)	0.1263
Costo de intervención promedio	527,528.0 USD
MTTRt	11,757.7 t
MTBFt	154,354.9 t
MTBMt	1,891,069.5 t
E_c preventivo	156.7 USD/h
E_c correctivo	34.1 USD/h
Disponibilidad técnica (A_t)	99.4 %
Presupuesto anual estimado	\$ 7,325,471.3

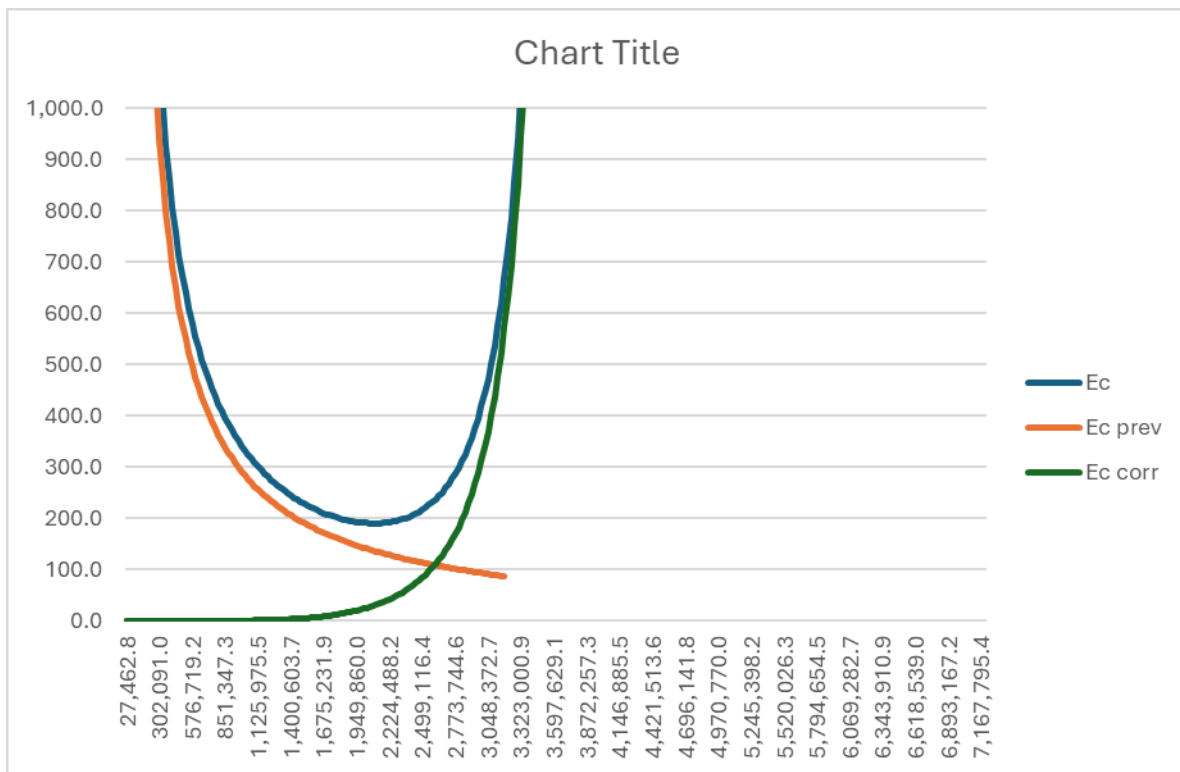


Fig. 5.42 Curva de costos de mantenimiento – BRIDON

10. Plan de Acción y Mejora

- Optimizar el reemplazo de cables

Implementar un programa de mantenimiento preventivo basado en confiabilidad, usando los umbrales obtenidos por análisis de Weibull y simulación de Montecarlo para definir el punto de reemplazo económico (PRE) de cada marca.

- Monitoreo y registro de datos

Establecer un sistema unificado de registro de horas de operación, toneladas izadas y causas de cambio, que sirva como base para actualizar periódicamente los parámetros de confiabilidad.

- Uso de tecnologías avanzadas

Incorporar herramientas de monitoreo en tiempo real, sensores IoT y análisis mediante Big Data o inteligencia artificial (IA), con el fin de anticipar fallas y estimar la vida útil remanente (RUL) de los cables.

- Gestión de abastecimiento y costos

Priorizar el uso de la marca que presente el menor costo equivalente (E_c) y la mayor disponibilidad técnica, manteniendo una segunda fuente como respaldo logístico.

- Capacitación técnica

Desarrollar entrenamientos periódicos para el personal de mantenimiento, enfocados en la interpretación de curvas Weibull, simulaciones y criterios de reemplazo económico.

11. Conclusiones

El cable PALEX demostró el mejor desempeño integral, combinando alta confiabilidad, menor costo equivalente horario y mayor disponibilidad técnica, siendo la opción recomendada para futuras adquisiciones.

El análisis económico evidencia que intervenir los cables según el punto de reemplazo económico (E_c mínimo) reduce los costos anuales de mantenimiento entre 15 % y 20 % respecto al esquema actual.

La simulación de Montecarlo permitió incorporar la incertidumbre operacional, mejorando la precisión en la proyección de fallas y tiempos de reemplazo.

El enfoque de este estudio puede aplicarse a otros componentes críticos de las palas (cables de suspensión, motores de izar, transmisiones), fortaleciendo la toma de decisiones en el mantenimiento predictivo.

La integración futura con sistemas de monitoreo en línea, Big Data e inteligencia artificial (IA) permitirá anticipar fallas en tiempo real y optimizar los planes de mantenimiento basados en condición, alineándose con los principios de la Minería 4.0

12. Recomendaciones

- Incorporar sistemas de monitoreo continuo de tensión y ciclos de carga de los cables, complementando las inspecciones visuales con sensores magnéticos o electromagnéticos conforme a la norma ISO 4309.
- Implementar una base de datos unificada para registrar horas, tonelaje y causas de cambio, que sirva como insumo para modelos de confiabilidad y aprendizaje automático.
- Evaluar el uso de algoritmos de IA y aprendizaje supervisado para estimar la vida útil remanente (RUL) de los cables, empleando variables operativas y ambientales.
- Integrar herramientas de Big Data y análisis en tiempo real para actualizar automáticamente los parámetros de Weibull y Montecarlo, reduciendo la dependencia de ajustes manuales.
- Desarrollar un programa piloto de mantenimiento predictivo digital, priorizando el uso de sensores IoT y tableros de control que muestren el estado de los cables en línea.
- Continuar la evaluación económica de proveedores y considerar contratos de suministro basados en rendimiento y confiabilidad comprobada, más que en costo unitario

13. Bibliografía

Abernethy, R.B. (2006) *The New Weibull Handbook*. North Palm Beach: Robert B. Abernethy.

AMIRA International (2012) *Wear and failure mechanisms in mining ropes*. Melbourne: AMIRA Report P923.

Galar, D., Kumar, U. and Parida, A. (2015) *Maintenance Performance Metrics: Theory and Applications*. London: Springer.

González, J. and Valenzuela, P. (2020) 'Análisis de vida útil de cables de izaje en palas mineras mediante monitoreo no destructivo', *Revista Minería y Metalurgia*, 42(1), pp. 18–25.

ISO (2006) *ISO 17359: Condition monitoring and diagnostics of machines – General guidelines*. Geneva: International Organization for Standardization.

ISO (2017) *ISO 4309: Cranes – Wire ropes – Care and maintenance, inspection and discard*. Geneva: International Organization for Standardization.

Jardine, A.K.S., Lin, D. and Banjevic, D. (2006) 'A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance', *Mechanical Systems and Signal Processing*, 20(7), pp. 1483–1510.

Kuo, W. and Zuo, M.J. (2003) *Optimal Reliability Modeling: Principles and Applications*. Hoboken: Wiley.

Meeker, W.Q. and Escobar, L.A. (1998) *Statistical Methods for Reliability Data*. New York: Wiley.

Metropolis, N. and Ulam, S. (1949) 'The Monte Carlo Method', *Journal of the American Statistical Association*, 44(247), pp. 335–341.

Mobley, R.K. (2002) *An Introduction to Predictive Maintenance*. 2nd edn. Houston: Butterworth-Heinemann.

Nelson, W. (2003) *Applied Life Data Analysis*. New York: Wiley-Interscience.

Rubinstein, R.Y. and Kroese, D.P. (2017) Simulation and the Monte Carlo Method. 3rd edn. Hoboken: Wiley.

Torres Farías, J. and Ramírez Castañeda, C. (2020) 'Aplicación de mantenimiento predictivo en sistemas de izaje en minería subterránea', Revista Ingeniería y Desarrollo, 38(2), pp. 45–55.

Wang, L., Hernández, R. and Ramírez, C. (2022) 'Failure prediction in hoist cables using hybrid statistical simulation models', Journal of Quality in Maintenance Engineering, 28(4), pp. 523–539.

Zio, E. (2013) The Monte Carlo Simulation Method for System Reliability and Risk Analysis. London: Springer.

14. Anexos

Anexo 1. Registros históricos de operación y fallas de los cables WRI, Bridon y Palex.
(Tablas completas con horas trabajadas, tonelaje izado y causa de cambio.)

Anexo 2. Gráficos de ajuste de la distribución de Weibull para cada marca de cable.
(Incluye las gráficas con R^2 , pendiente β y curva ajustada.)

Anexo 3. Resultados de simulación de Monte Carlo.
(Tablas con TBF simulados, fechas estimadas de recambio y probabilidades mensuales de falla.)

Anexo 4. Curvas de confiabilidad y función de riesgo $h(t)$ por tipo de cable.
(Gráficos comparativos generados en Excel para WRI, Bridon y Palex.)

Anexo 5. Curvas de costo de mantenimiento (preventivo vs. correctivo).
(Figuras y tablas que muestran los puntos de reemplazo económico y el costo equivalente Ec.)

Anexo 6. Resumen de indicadores técnicos y económicos comparativos.
(Tabla consolidada con $R(t)$, MTBF, disponibilidad técnica y presupuesto anual estimado.)