



UNIVERSIDAD  
**SAN SEBASTIAN**  
VOCACIÓN POR LA EXCELENCIA

FACULTAD DE INGENIERÍA, TECNOLOGÍA, DISEÑO  
Y ARQUITECTURA  
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL EN MINAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA  
SEDE SANTIAGO – BELLAVISTA

**Viabilidad Técnica y Económica de Propuestas de Control para el  
Desgaste Prematuro de Neumáticos de camiones CAEX Komatsu 980E:  
Un Enfoque Basado en la Evaluación de Proyectos**

Trabajo de Proyecto de Título para Optar al Título de Ingeniero Civil En Minas

Autor: Patricio Ignacio Flores Bascuñán  
Profesor Guía: Mg Luis de la Torre Urzúa

# Dedicatoria

A mi familia, quienes fueron un pilar fundamental en todo este proceso.

A mi padre, quien me ayudo con consejos y me ayudo a entablar contactos  
con profesionales que me aportaron datos.

A mi mamá, que me dio apoyo emocional y consejos para perseverar y  
cumplir mis metas.

A mi hermana, que siempre me ayudaba a distraerme y me sacaba una  
sonrisa.



---

## Agradecimiento

Quiero agradecer a mis padres porque gracias a ellos estoy acá en la última etapa de mi formación profesional, gracia a sus insistencias, sus motivaciones, sus esfuerzos y sacrificios. Ellos hicieron todo lo que estuvo a su alcance para formarme como persona, inculcando siempre el “se respetuoso”, “se educado”, “aprende de las experiencias”, “da tu 101% y más”, el perseverar. Todo es gracias a ellos.

Agradecer a mi hermana que cuando más cerca estaba de caer, me daba razones para levantarme. Y no menos importante a mis mascotas las cuales siempre están ahí para darme felicidad y risas.

Gracias a mis amigos: Daniel, Abby, Jorge, Laura, Felipe, Martín y Maximiliano, dado que ellos dan su máximo apoyo y animo en momentos cruciales cuando la familia no esta cerca, por sus repentinas ideas que ayudaban a olvidar malos ratos.

Gracias a mi abuelita Jaqueline por educarme en los momentos que me cuidaba y por sus mimos, que aunque este al otro lado del mundo, siempre esta al pendiente mio y de mi familia.

Gracias a la Universidad San Sebastián por entregarme estos conocimientos que me ayudaron a formarme como un futuro Ingeniero Civil en Minas.

A la doña Cheryl por aportar con datos relevantes en el presente estudio, a don Gonzalo que también me entrego datos relevantes.

Agradecer también al profesor Luis de la Torre por aceptar ser mi profesor guía en este estudio, por estrictas retroalimentaciones y sus enseñanzas .

Finalmente agradecer a todos los profesores y compañeros que fui conociendo en esta etapa universitaria, que me enseñaron muchas cosas y me entregaron recuerdos interesantes. Agradecer a profesores que fueron altamente estrictos con sus asignaturas, los cuales hacian su trabajo, formando buenos profesionales.



Tabla de contenido

1. Resumen .....	10
2. Introducción .....	14
3. Marco Teórico .....	15
3.1. División Gabriela Mistral .....	15
3.2. Minería a Cielo Abierto .....	17
3.3. Transporte en la minería .....	17
3.4. Neumáticos OTR (Off the Road) .....	18
3.4.1 Partes de los Neumáticos .....	19
3.4.2. Tipos de neumáticos .....	21
3.4.3. Uso de neumáticos .....	23
3.4.4. Posición de los neumáticos OTR en camiones CAEX .....	27
3.5. LAS ZIRH .....	29
3.5 Camiones CAEX Komatsu 980E .....	30
3.5.1 Motor .....	30
3.5.2 Tracción Eléctrica .....	30
3.5.3 Cabina .....	31
3.5.4 Suspensión .....	31
3.5.5 Bastidor .....	31
3.5.6 Carrocería .....	32
3.5.7 Sistema de Frenos .....	32
3.5.8 Sistema de enfriamiento .....	33
3.5.9 Capacidades de relleno de servicio .....	33
3.5.10 Dimensiones .....	34
3.5.11 Sistema hidráulico .....	34
3.6. Índice de ASARCO .....	35
3.6.1. Formulas indice de ASARCO .....	37
3.6.2. Criterio ASARCO .....	38
3.7. CAPM y WACC .....	39
3.7.1 Concepto WACC .....	39
3.7.2 Componentes WACC .....	39
3.7.3 Importancia del WACC en un análisis financiero .....	39
3.7.4 Como calcular WACC paso a paso .....	40
3.7.5 Interpretación WACC .....	41
3.7.6 Uso del WACC en el presupuesto de capital .....	42
3.7.7 WACC y tasa de descuento .....	42
3.7.8 Suposiciones cálculo WACC .....	42
3.7.9 WACC y evaluación de riesgo .....	42
3.7.10 Concepto CAPM .....	43
3.7.11 Como calcular CAPM .....	44
4. Problema, Solución .....	46
4.1 Problema .....	46
4.2 Solución .....	46
5. Objetivos .....	48
5.1. General .....	48
5.2. Especificos .....	48
6. Metodología .....	49
7. Identificación de las variables que influyen en el desgaste de los neumáticos en equipos mineros, considerando factores operacionales, ambientales y diseño que afectan su durabilidad .....	50
7.1. Cortes y separaciones de las banda de rodadura .....	51
7.2. Presión de inflado .....	53
7.3. Temperatura interna del neumático .....	54
7.4. Sobrecarga .....	54
7.5. Conducción de la maquinaria .....	55
7.6. Trazado y mantenimiento de las pistas .....	55



---

7.7. Duración y longitud de los ciclos .....	56
7.8. Velocidades excesivas .....	56
7.9. Condiciones climáticas .....	56
7.10. Mantenimiento mecánico .....	57
7.11. Posición de los neumáticos .....	57
7.12. Diferencia de diámetros de los neumáticos .....	57
7.13. Reparación de los neumáticos .....	58
8. Análisis y clasificación de las variables críticas que afectan al desgaste de los neumáticos en la minería, identificando riesgos significativos con impacto económico, operativo y ambiental, para priorizar su gestión en la operación minera. ....	65
9. Propuestas de diseño de un sistema de control o medidas de control para optimizar el uso de neumáticos en equipos mineros, mitigando el desgaste, considerando el riesgo más crítico y alineándose con la sostenibilidad y eficiencia empresarial. ....	69
9.1. Cadenas de protección de neumáticos .....	69
9.2. Pitcrew AI .....	72
9.3. Sistema de monitoreo de presión y temperatura (TPMS) .....	80
9.4. Programa de Capacitación para Operadores: Buenas Prácticas de Conducción en Minería .....	84
10. Viabilidad técnica y económica de uno de los sistemas de control propuestos, determinando 3 situaciones distintas que impacten el análisis. ....	87
10.1. Plan operacional y recursos .....	87
10.2. Flota camiones CAEX Mina Gabriela Mistral .....	88
10.3. Planificación operativa .....	89
10.4. Tasa de descuento .....	90
10.5. Q de equilibrio .....	91
10.6. Costos e ingresos .....	92
10.7. Gastos de administración, comercialización y financiamiento .....	94
10.8. Depreciación y valor residual .....	98
10.9. Plan de monitoreo para los casos a evaluar .....	99
10.10. Evaluación económica para 3 casos distintos (normal, optimista y pesimista) .....	102
11. Conclusiones .....	107
12. Bibliografía .....	110
13. Anexo .....	115



## Índice de Tablas

Tabla 1 . Factores que afectan la vida útil promedio de los neumáticos (TLR = reducción de la vida útil de los neumáticos) .....	25
Tabla 2 . Riesgos críticos de las variables .....	66
Tabla 3 . Causa - Costos con un valor de neumático aproximado de USD\$50.000 ..	115
Tabla 4 .Causa - Costo con un valor de neumáticos aproximado de USD\$75.000 ...	115
Tabla 5 . Programa de actividades para instalación .....	83
Tabla 6 . Recursos considerados con sus respectivos costos en \$USD .....	87
Tabla 7 . Personal considerados con sus respectivos sueldos y descuentos .....	87
Tabla 8 . Flota de 20 CAEX con su marca y modelo, sumado al tipo y marca de neumático que emplean destacando su durabilidad .....	88
Tabla 9 . Indicadores Operativos y de Mantenimiento para Camiones por Mes .....	89
Tabla 10 . Planificación de turnos y distribución de días laborales por cargo .....	116
Tabla 11 . Resumen horas trabajadas y valor hora hombre por cargo .....	90
Tabla 12 .Parámetros base para el cálculo de la tasa de descuento en escenarios financieros .....	91
Tabla 13 . Q equilibrio servicio de monitoreo .....	92
Tabla 14 . Q de equilibrio servicio de cámara .....	92
Tabla 15 . Costo fijo (Total) instalación de cámaras .....	93
Tabla 16 . Costos fijos (Total) del servicio de monitoreo .....	93
Tabla 17 . Costo variable unitario (Total) de la instalación de cámaras .....	116
Tabla 18 . Costos variable unitario (Total) del servicio de monitoreo .....	117
Tabla 19 . Gastos administración y arriendo de oficina .....	94
Tabla 20 . Tabla de amortización caso pesimista .....	95
Tabla 21 . Tabla de amortización caso optimista .....	96
Tabla 22 . Tabla de amortización caso normal .....	97
Tabla 23 . Cálculo de depreciación anual y valor residual para caso normal .....	98
Tabla 24 . Cálculo de depreciación anual y valor residual para caso optimista .....	98
Tabla 25 . Cálculo de depreciación anual y valor residual para caso pesimista .....	98
Tabla 26 . Plan monitoreo caso normal .....	99
Tabla 27 . Plan monitoreo optimista .....	100
Tabla 28 . Plan monitoreo pesimista .....	101
Tabla 29 . Evaluación económica caso normal .....	118
Tabla 30 . Evaluación económica escenario optimista .....	119
Tabla 31 . Evaluación económica escenario pesimista .....	120



## Índice de imágenes

Imagen 1 . Partes de neumáticos .....	19
Imagen 2 . Partes de neumáticos .....	19
Imagen 3 . Esquema de funcionamiento de la extracción de material de una mina .....	27
Imagen 4 . Neumático minero OTR .....	28
Imagen 5 . Posicionamiento de neumáticos OTR .....	29
Imagen 6 . Dimensiones CAEX Komatsu 980E .....	34
Imagen 7 . Índice de ASARCO o Norma ASARCO .....	36
Imagen 8 . Neumático con corte en la banda de rodamiento. ....	51
Imagen 9 . Neumático con separación por calor. ....	52
Imagen 10 . Neumático con separación mecánica. ....	52
Imagen 11 . Diferencia en desgaste del neumático según la presión de inflado. ....	53
Imagen 12 . Distribución de carga en la tolva del camión .....	54
Imagen 13 . Restricciones de diseños de las pistas. ....	55
Imagen 14 . Diagrama de Ishikawa .....	65
Imagen 15 . Inspección Autónoma de Neumáticos OTR .....	77
Imagen 16 . Pasos desde la detección de falla hasta la inspección de daños .....	79
Imagen 17 . Ciclo de Deming .....	82

## Índice de Gráficos

Gráfico 1 . Diagrama de Pareto .....	67
--------------------------------------	----

## Índice de Ecuaciones

Ecuación 1 . Disponibilidad ASARCO .....	37
Ecuación 2 . Utilización Efectiva ASARCO .....	37
Ecuación 3 . Eficiencia Operacional ASARCO .....	37
Ecuación 4 . Rendimiento Efectivo ASARCO .....	38
Ecuación 5 . Fórmula para calcular la rentabilidad de un activo .....	44
Ecuación 6 . Q de Equilibrio .....	93



## Glosario de términos

- **Amortización:** Proceso de distribuir el costo de un activo o una deuda a lo largo del tiempo para reflejar su uso gradual o su pago en cuotas.
- **Botaderos:** Áreas designadas en una mina para depositar material sin valor comercial, como rocas y estériles extraídos durante la operación.
- **CAEX (Camión de Extracción):** Vehículo de gran tamaño utilizado en minería a cielo abierto para transportar grandes volúmenes de material desde la mina hasta la planta de procesamiento o botaderos.
- **Cadenas de protección para neumáticos:** Mallas metálicas que se colocan alrededor de los neumáticos para protegerlos de cortes y daños en terrenos rocosos o abrasivos.
- **Costo fijo y variable:** Los costos fijos son aquellos que no cambian independientemente de la producción (ejemplo: arriendo de oficinas), mientras que los costos variables dependen del nivel de producción (ejemplo: el consumo de insumos).
- **Depreciación:** Pérdida de valor de un activo con el tiempo debido al uso, obsolescencia o desgaste.
- **Electro-obtención (EW - Electrowinning):** Técnica utilizada en minería para obtener cobre puro en forma de cátodos mediante un proceso de electrólisis.
- **Escenarios financieros (optimista, normal y pesimista):** Diferentes proyecciones económicas utilizadas en la evaluación de proyectos para estimar posibles resultados según variaciones en costos, ingresos y riesgos.
- **Índice ASARCO:** Métrica utilizada en minería para evaluar la eficiencia y disponibilidad de los equipos, midiendo aspectos como el tiempo de operación y mantenimiento.
- **Lixiviación clorurada:** Proceso químico en minería que usa cloro y otros compuestos para extraer cobre de minerales sulfurados, mejorando la eficiencia de recuperación.
- **Neumáticos OTR (Off-The-Road):** Neumáticos de gran tamaño diseñados específicamente para operar en terrenos difíciles, como los de minería y construcción.





- **Picrew AI:** Sistema basado en inteligencia artificial que analiza imágenes térmicas y datos de los neumáticos para detectar daños o separaciones antes de que ocurran fallas graves.
- **Presión de inflado:** Cantidad de aire comprimido dentro del neumático, medida en psi (libras por pulgada cuadrada) o bar.
- **Punto de equilibrio:** Nivel de ingresos o reducción de costos en el que un proyecto ni gana ni pierde dinero. Es el punto en el que los ingresos cubren exactamente los costos totales.
- **Sistema TPMS (Tire Pressure Monitoring System):** Tecnología que monitorea en tiempo real la presión y temperatura de los neumáticos mediante sensores, ayudando a prevenir fallas y mejorar el mantenimiento.
- **Sobrecarga:** Exceso de peso sobre el camión o sus neumáticos, lo que puede provocar fallas mecánicas, desgaste acelerado y riesgos de seguridad.
- **Suspensión hidroneumática:** Tecnología de amortiguación que utiliza un fluido hidráulico y gas para absorber impactos y mejorar la estabilidad de vehículos pesados.
- **Temperatura interna del neumático:** Calor generado dentro del neumático debido a la fricción y el peso que soporta.
- **Tasa de descuento:** Porcentaje utilizado en finanzas para calcular el valor presente de flujos de dinero futuros, teniendo en cuenta la inflación y el costo de oportunidad.
- **Tasa Interna de Retorno (TIR):** Porcentaje que mide la rentabilidad de una inversión. Si la TIR es mayor que la tasa de descuento, el proyecto es viable.
- **Tracción eléctrica:** Sistema de propulsión de camiones mineros que utiliza motores eléctricos en lugar de mecánicos para mejorar la eficiencia y reducir el consumo de combustible.
- **Valor Actual Neto (VAN):** Indicador financiero que mide la rentabilidad de una inversión, calculando la diferencia entre el dinero que se espera recibir y la inversión inicial. Un VAN positivo indica que el proyecto es rentable.



## 1. Resumen

El presente trabajo muestra las causas del desgaste de neumáticos presente en una flota de 20 camiones de extracción (CAEX) de la División Gabriela Mistral, ubicada en la Región de Antofagasta, comuna Sierra Gorda. Se plantean diversas causas del desgaste donde las que más destacan son el desgaste de neumáticos por altas temperaturas, desgaste de neumáticos por cortes y desgaste de neumáticos por sobrecarga. Luego de identificar las causas que afectan a la durabilidad del neumático, se plantean diversas tecnologías como soluciones, estas tecnologías se establecieron bajo 3 factores importantes: operacional, económico y ambiental. Las tecnologías planteadas fueron:

- Cadenas de protección para neumáticos: Reducen el contacto directo entre el neumático y el terreno, minimizando daños por cortes y mejorando la disipación térmica, lo que prolonga la vida útil del componente.
- Sistemas de monitoreo TPMS: Incorporan sensores de presión y temperatura en tiempo real, facilitando el control de variables críticas como el calor interno, lo que disminuye fallos prematuros y optimiza la gestión del mantenimiento preventivo.
- Pitcrew AI: Herramienta basada en inteligencia artificial que combina imágenes térmicas y aprendizaje automático para detectar lesiones y separaciones en los neumáticos. Esta tecnología permite una identificación temprana de fallas, reduciendo riesgos de accidentes y mejorando la seguridad operativa.
- Programa de capacitación para operadores: Orientado a promover prácticas de conducción eficiente y segura, con foco en la preservación de los neumáticos. Incluye formación en técnicas de manejo según condiciones del terreno y mantenimiento preventivo.

Posterior a la propuesta de soluciones tecnológicas, se llevó a cabo una evaluación económica detallada para determinar la viabilidad de implementar un sistema de monitoreo de neumáticos. Este análisis consideró tres escenarios económicos: optimista, normal y pesimista.

El estudio incluyó el diseño de un plan operacional que abarcó aspectos clave como la dotación de personal, los recursos necesarios y la configuración de una flota compuesta por 20 camiones de extracción (CAEX) de la División Gabriela Mistral, considerando sus índices ASARCO (HN, HD, HM).

Además, se evaluaron características técnicas y operativas, como el modelo específico de los CAEX, el tipo de neumáticos utilizados, su vida útil, y las



horas destinadas a mantenimiento preventivo. Se desarrolló una planificación detallada de los turnos laborales, estimando las horas-hombre y el costo asociado por unidad de trabajo.

Asimismo, se calcularon parámetros financieros clave, incluyendo la tasa de descuento y el punto de equilibrio (Q de Equilibrio) para los servicios de monitoreo y la instalación de sensores. El análisis incorporó una descomposición de los costos fijos y variables unitarios relacionados con la implementación del sistema.

Se identificaron además los gastos administrativos, el esquema de financiamiento disponible en cada escenario, y los costos de comercialización. Como parte del análisis financiero, se elaboraron tablas de amortización y se calcularon las tasas de depreciación para cada uno de los escenarios. También se diseñó un plan de monitoreo preventivo ajustado a las necesidades operativas de los CAEX en función de sus ciclos de mantenimiento.

Finalmente, se calcularon indicadores financieros como el Valor Actual Neto (VAN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR) para cada escenario. Los resultados obtenidos demostraron la factibilidad técnica y económica de la solución propuesta, considerando las variaciones asociadas a los distintos escenarios evaluados (optimista, normal y pesimista).



---

## Abstract.

The present work identifies the causes of tire wear in a fleet of 20 haul trucks (CAEX) at the Gabriela Mistral Division, located in the Sierra Gorda commune, Antofagasta Region. Several causes of tire wear are proposed, with the most notable being tire wear due to high temperatures, tire wear caused by cuts, and tire wear due to overloading. After identifying the factors affecting tire durability, various technologies are proposed as solutions. These technologies were established based on three key factors: operational, economic, and environmental.

The proposed technologies were:

- Tire Protection Chains: Reduce direct contact between the tire and the terrain, minimizing damage from cuts and improving thermal dissipation, which extends the component's lifespan.
- TPMS Monitoring Systems: Incorporate real-time pressure and temperature sensors, enabling control of critical variables such as internal heat. This reduces premature failures and optimizes preventive maintenance management.
- Pitcrew AI: An artificial intelligence tool that combines thermal imaging and machine learning to detect injuries and separations in tires. This technology enables early fault detection, reducing accident risks and enhancing operational safety.
- Operator Training Program: Aimed at promoting efficient and safe driving practices, focusing on tire preservation. It includes training on driving techniques tailored to terrain conditions and preventive maintenance.

Following the proposal of technological solutions, a detailed economic evaluation was conducted to determine the feasibility of implementing a tire monitoring system. This analysis considered three economic scenarios: optimistic, normal, and pessimistic.

The study included the design of an operational plan that addressed key aspects such as staffing, required resources, and the configuration of a fleet consisting of 20 haul trucks (CAEX) from the Gabriela Mistral Division, taking into account their ASARCO indices (HN, HD, HM).

Additionally, technical and operational characteristics were evaluated, including the specific model of the haul trucks (CAEX), the type of tires used, their lifespan, and the hours allocated to preventive maintenance. A detailed work shift schedule was developed, estimating man-hours and the associated cost per unit of work.



Key financial parameters were also calculated, including the discount rate and the breakeven point (Q of Equilibrium) for monitoring services and sensor installation. The analysis included a breakdown of fixed and variable unit costs related to the system's implementation.

Administrative expenses, the financing scheme available in each scenario, and marketing costs were also identified. As part of the financial analysis, amortization schedules were prepared, and depreciation rates were calculated for each scenario. A preventive monitoring plan was also designed, tailored to the operational needs of the haul trucks (CAEX) based on their maintenance cycles.

Finally, financial indicators such as Net Present Value (NPV) and Internal Rate of Return (IRR) were calculated for each scenario. The results demonstrated the technical and economic feasibility of the proposed solution, taking into account the variations associated with the evaluated scenarios (optimistic, normal, and pessimistic).



## 2. Introducción

La minería en Chile constituye un pilar fundamental de la identidad nacional, siendo el principal productor mundial de cobre, con una contribución cercana al 28% de la producción global. Además, el país posee importantes reservas de otros minerales estratégicos, como litio, oro, plata y molibdeno. Esta relevancia minera impacta significativamente en los ámbitos sociales, culturales y políticos del país.

La actividad minera chilena tiene raíces ancestrales, remontándose a la explotación de oro y plata durante las épocas precolombina y colonial. Sin embargo, fue a partir del siglo XX cuando la industria experimentó un auge notable, impulsado por la intensificación de la minería del cobre y la incorporación de tecnologías de vanguardia. Este desarrollo se consolidó con la nacionalización del cobre en la década de 1970, cuando el Estado asumió el control de los principales yacimientos mediante la creación de CODELCO (Corporación Nacional del Cobre).

CODELCO, actualmente la mayor productora de cobre a nivel mundial, opera a través de diversas divisiones distribuidas estratégicamente en el territorio nacional. Entre las principales se encuentran las Divisiones Chuquicamata, Radomiro Tomic, Ministro Hales, El Teniente, Andina, Salvador y Gabriela Mistral (también conocida como "Gaby").

En la actualidad, la División Gabriela Mistral enfrenta desafíos operativos significativos relacionados con el desgaste de neumáticos en los equipos de transporte de material, como los camiones de alto tonelaje Komatsu 980E. Este problema es crítico debido a su impacto en los costos operativos y en la seguridad, ya que el desgaste excesivo o prematuro puede derivar en accidentes que afecten la continuidad operacional y la productividad del proceso mina-planta (corte y transporte, C&T). Según la literatura técnica, estas incidencias pueden representar pérdidas económicas que alcanzan hasta un 30% de los costos operacionales.

Los camiones utilizados en "Gaby" están equipados con seis neumáticos: dos en el eje delantero (eje 1) y cuatro en el eje trasero (eje 2), numerados del 1 al 6 de izquierda a derecha, como se ilustra en la Imagen 5.

El desgaste prematuro de los neumáticos puede originarse por diversos factores operacionales, tales como presiones de inflado excesivas, altas temperaturas internas, sobrecarga del equipo, entre otros. Estos factores contribuyen al acortamiento de la vida útil de los neumáticos, lo que incrementa los costos de mantenimiento y reduce la disponibilidad del equipo crítico para la operación.



---

## 3. Marco Teórico

### 3.1. División Gabriela Mistral

El yacimiento Gabriela Mistral, ubicado en la Región de Antofagasta, específicamente en la comuna de Sierra Gorda, se encuentra a 120 kilómetros al suroeste de Calama, a una altitud de 2.660 metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m). Este depósito cuenta con un recurso estimado de 620 millones de toneladas de mineral oxidado, presentando una ley promedio de 0,41% de cobre total, lo que lo posiciona como una fuente relevante de extracción cuprífera. La operación del yacimiento inició en 2008 bajo la gestión de Minera Gaby S.A., una filial 100% propiedad de la Corporación Nacional del Cobre (Codelco). Posteriormente, en diciembre de 2012, esta filial fue reorganizada para conformar la nueva División Gabriela Mistral, integrándose plenamente al sistema divisional de Codelco. [42]

La explotación del yacimiento se realiza mediante minería a cielo abierto, empleando camiones de operación autónoma, lo que representa una innovación tecnológica en la industria minera. El proceso productivo comprende múltiples etapas, iniciando con el chancado del mineral en sus fases primaria, secundaria y terciaria. Posteriormente, el material es sometido a un curado en tambores acidificadores, seguido por la lixiviación en pilas dinámicas para la extracción del cobre. Los rípios resultantes son dispuestos en áreas destinadas para su manejo adecuado. El proceso continúa con la extracción por solventes (SX) y la electro-obtención (EW), etapas que permiten la obtención de cátodos de alta pureza, los cuales son finalmente transportados al puerto de Mejillones para su comercialización. [42]

La División Gabriela Mistral se destaca como la primera operación minera a nivel mundial en emplear el 100% de su flota de camiones de extracción bajo la modalidad autónoma. Esta implementación tecnológica representa un avance significativo en la automatización de procesos mineros, mejorando la eficiencia operativa y la seguridad. Además, la tecnología utilizada está en constante evaluación y monitoreo, lo que garantiza su óptimo desempeño y la posibilidad de incorporar mejoras continuas en respuesta a las demandas de la operación. [42]

En cuanto a la protección del medio ambiente, la División Gabriela Mistral ha implementado una operación limpia y no contaminante, alineada con los estándares internacionales de sostenibilidad. La compañía mantiene un enfoque proactivo en la evaluación y adopción de tecnologías que minimicen su impacto ambiental, destacando entre estas el uso de energía solar para diversas aplicaciones operativas. Este compromiso con la innovación energética subraya la estrategia de la empresa para optimizar sus procesos productivos mientras reduce su huella de carbono. [42]



En el ámbito de los derechos fundamentales laborales y en alineación con su Modelo de Negocios, la División Gabriela Mistral se destaca por promover la inclusión y equidad de género en el sector minero. Actualmente, la participación femenina alcanza un 25% de su dotación de trabajadores directos, distribuidos tanto en áreas productivas como administrativas, cifra significativamente superior al promedio de 6% observado en la industria minera nacional. Este logro posiciona a la División Gabriela Mistral como la empresa minera con el mayor porcentaje de mujeres en Chile, consolidándose como un referente en diversidad e inclusión laboral. [42]

La División Gabriela Mistral cuenta con un potencial productivo estimado de aproximadamente 170.000 toneladas anuales de cobre fino. Este nivel de producción refleja la capacidad operativa de la mina y su contribución significativa al abastecimiento global de cobre, consolidándose como una de las operaciones clave en la industria cuprífera nacional e internacional. [42]

La División Gabriela Mistral presentó al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA) el estudio denominado “Continuidad Operacional y Transición Hídrica del Proyecto Minero DGM”. Este proyecto tiene como objetivo principal extender la vida útil del yacimiento hasta el año 2055, garantizando la sostenibilidad de sus operaciones a largo plazo mediante la incorporación de prácticas más eficientes en el uso de recursos hídricos y la implementación de tecnologías innovadoras que mitiguen el impacto ambiental. [43]

La División Gabriela Mistral ha obtenido importantes reconocimientos internacionales que avalan su compromiso con la sostenibilidad y la producción responsable. Entre ellos destacan el sello The Copper Mark de Producción Responsable y el sello The Copper Mark de Cadena de Custodia, que certifican el cumplimiento de altos estándares en la gestión ambiental, social y de gobernanza. Además, sus cátodos se convirtieron en los primeros en Chile en recibir el sello Huella Chile, una distinción otorgada por la medición y gestión de su huella de carbono, reafirmando su liderazgo en prácticas sostenibles dentro de la industria minera. [43]

El Estudio de Impacto Ambiental (EIA) presentado por la División Gabriela Mistral está enfocado en la ampliación de la vida útil de la explotación minera y en el beneficio de minerales, con un énfasis particular en asegurar el abastecimiento hídrico a largo plazo que permita la continuidad de las operaciones y habilite la implementación de la lixiviación clorurada. Este proyecto contempla la explotación de óxidos en la etapa inicial, seguida de una transición hacia minerales sulfurados. En esta fase, se incorporará el uso de cloruro de sodio (sal) en el proceso de lixiviación clorurada, lo que permitirá optimizar la recuperación de minerales lixiviables. Además, el proyecto incluye la ampliación de obras de soporte minero, tales como el rajo, el botadero y los stocks, así como la reubicación de instalaciones de apoyo





dentro de las operaciones para garantizar la eficiencia y sostenibilidad del proceso productivo. [43]

Para afrontar estos desafíos, el proyecto contempla una inversión aproximada de 800 millones de dólares y se basa en la utilización de las instalaciones y procesos existentes, complementados con mejoras estratégicas. Entre las principales iniciativas destaca una transición hídrica que busca eliminar completamente el uso de agua continental para el año 2035. Este objetivo será alcanzado mediante la migración al consumo de agua proveniente de terceros autorizados y evaluados ambientalmente, garantizando así una gestión hídrica sostenible y en línea con los compromisos ambientales de la operación. [43]

"Este proyecto refleja nuestro compromiso con el país, al continuar contribuyendo al desarrollo económico mediante la generación de recursos, empleo regional y el fortalecimiento de proveedores locales y nacionales. Asimismo, respalda el propósito de Codelco de ser un pilar en el desarrollo sustentable de Chile y el mundo", afirmó Claudia Cabrera, gerente general de la División Gabriela Mistral. Este enfoque estratégico subraya la integración de la operación minera con el bienestar de las comunidades y el respeto por los principios de sostenibilidad a nivel global. [43]

### **3.2. Minería a Cielo Abierto**

La minería a cielo abierto se puede definir como el proceso de excavar cualquier depósito de mineral cercano a la superficie mediante una excavación o corte realizado en la superficie, utilizando uno o más bancos horizontales para extraer el mineral mientras se deposita la sobrecarga y los relaves en un sitio de disposición dedicado fuera del límite final del pozo. La minería a cielo abierto se utiliza para la extracción de minerales metálicos y no metálicos; la aplicación de este método de minería en el carbón es menos común. Se considera que la minería a cielo abierto es diferente de la cantera, ya que extrae selectivamente el mineral en lugar de un agregado o un producto de piedra dimensional. La principal diferencia entre la minería de tiras—comúnmente utilizada en la minería de depósitos poco profundos y en capas—y la minería a cielo abierto radica en la disposición de la sobrecarga.

En la minería de tiras, la sobrecarga se vierte directamente sobre paneles ya minados en lugar de fuera del límite final del pozo, como es típico en la minería a cielo abierto. [1]

### **3.3. Transporte en la minería**

- Automatización del transporte: Los camiones autónomos están siendo implementados en minas a cielo abierto, con beneficios como el aumento de la productividad y la seguridad. Se espera que las operaciones autónomas reduzcan los costos operativos y extiendan la vida útil de



componentes clave como el sistema de frenos y los neumáticos, además de disminuir el consumo de combustible.

- Beneficios de la automatización: Se menciona que el uso de sistemas autónomos puede generar un aumento de la productividad de hasta un 20%, y mejorar la utilización de los equipos de transporte en un 10-20%. Esto se debe a que elimina variaciones en el rendimiento causadas por operadores humanos, como las pausas fisiológicas y los cambios de turno.
- Simulación de escenarios: El estudio utiliza simulaciones para comparar diferentes escenarios de operación minera con y sin camiones autónomos. Los resultados muestran mejoras en la productividad del transporte y una reducción del tiempo de inactividad del equipo.
- Impacto en la eficiencia: La implementación de camiones autónomos mejora la eficiencia de la flota al eliminar las pérdidas asociadas a factores humanos. Se observa que el uso de la flota aumenta entre un 3% y un 7%, y que la productividad del sistema autónomo aumenta en promedio entre un 6,4% y un 15,6%. [2]

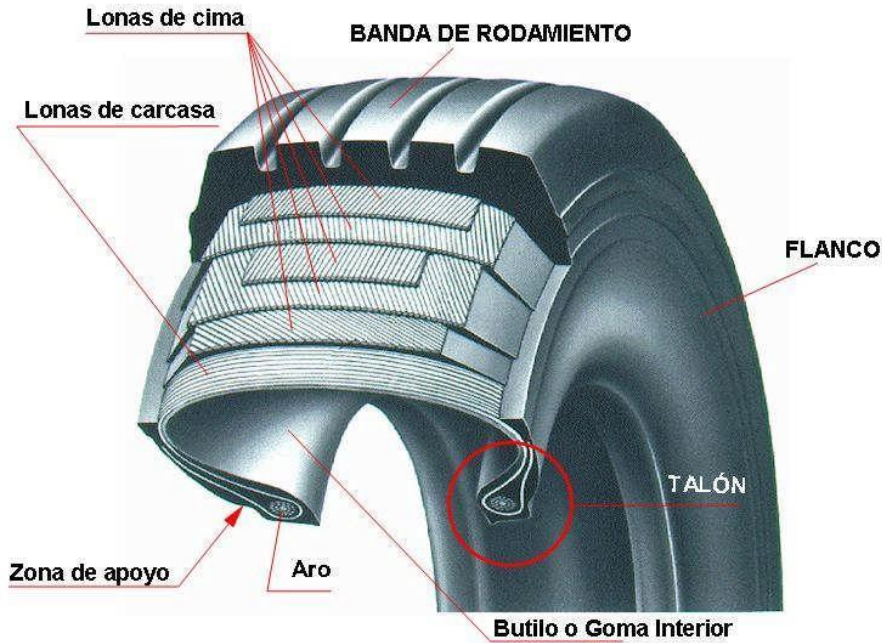
### **3.4. Neumáticos OTR (Off the Road)**

Según Morales, J. (2020), los neumáticos son componentes toroidales fabricados principalmente de caucho, diseñados para instalarse en las ruedas de diversos vehículos y maquinarias utilizadas en operaciones mineras. Su función principal es garantizar un contacto efectivo mediante adherencia y fricción con las superficies de rodadura, permitiendo el desarrollo de tareas clave como el arranque, frenado y dirección del equipo. En los neumáticos con cámara, el caucho inflable contiene una estructura interna tubular con forma toroidal, ubicada entre el neumático y la llanta, que se encarga de retener el aire a presión. En contraste, los neumáticos sin cámara integran directamente la contención del aire presurizado entre el propio neumático y la llanta, optimizando la resistencia y el rendimiento en condiciones exigentes del entorno minero.

Los neumáticos constituyen el único punto de contacto entre el vehículo y el terreno, siendo fundamentales para el comportamiento dinámico del equipo, es decir, cómo interactúa y se desplaza sobre las diversas condiciones del suelo. Además, desempeñan un papel clave en la capacidad de la rueda para cumplir sus funciones esenciales, tales como proporcionar tracción, direccionar el movimiento, amortiguar impactos, garantizar la estabilidad del vehículo y soportar adecuadamente la carga operativa.

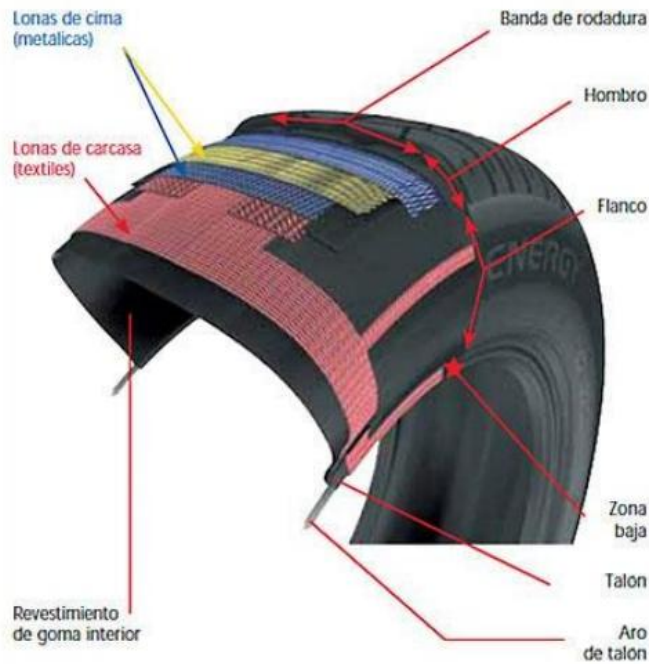
### 3.4.1 Partes de los Neumáticos

Imagen 1. Partes de neumáticos



Fuente: Web de Euromaster-neumáticos.

Imagen 2. Partes de neumáticos



Fuente: Web de Euromaster-neumáticos.



- **Hombro:** La goma del hombro es la más gruesa del neumático, ya que está diseñada para soportar las condiciones más exigentes debido a su exposición directa a bordillos, impactos y otros elementos externos. Además de ofrecer resistencia mecánica, su diseño optimiza la distribución y disipación del calor generado por la fricción durante el movimiento del neumático sobre la superficie de rodadura, garantizando un rendimiento eficiente y prolongando su vida útil. (Morales, J. 2020)
- **Lonas de carcasa:** Son refuerzos compuestos por cables de fibras textiles dispuestos en forma de arcos a ángulos rectos y adheridos al caucho de las cubiertas. Estos elementos estructurales proporcionan la resistencia necesaria para que el neumático soporte la presión interna, garantizando su estabilidad y rendimiento bajo las condiciones de operación. (Morales, J. 2020)
- **Flanco:** Está compuesto de goma flexible diseñada para adaptarse a las deformaciones que experimenta el neumático durante la fase de rodadura. Su función principal es proteger al neumático contra impactos laterales. Esta área, constituida por una capa de goma extra-gruesa que se extiende desde el talón hasta la banda de rodadura, proporciona estabilidad lateral al vehículo. Además, en esta sección se encuentra toda la información técnica relacionada con el fabricante del neumático, lo cual es esencial para su identificación y especificaciones de uso. (Morales, J. 2020)
- **Banda de rodadura:** La banda de rodadura es una de las partes más críticas del neumático, ya que proporciona tanto amortiguación como agarre, elementos esenciales para el rendimiento del vehículo. Su diseño, así como los compuestos utilizados en su fabricación, influyen directamente en características clave como la tracción, la durabilidad y la capacidad de manejo en diferentes condiciones de terreno. La banda de rodadura puede incorporar diversos compuestos, especialmente diferenciados entre el centro y las zonas de los hombros, para optimizar el rendimiento en términos de adherencia, resistencia al desgaste y disipación de calor en distintas áreas del neumático. (Morales, J. 2020)
- **Talón:** La parte interior del neumático que se ajusta a la llanta, conocida como el talón, está compuesta por alambres de acero de alta tecnología configurados en un cable trenzado y de forma circular. Esta estructura garantiza un ajuste seguro entre el neumático y la llanta, evitando deslizamientos o desalineaciones durante el funcionamiento, incluso bajo altas cargas y condiciones operativas extremas. (Morales, J. 2020)
- **Lonas de cima:** Se trata de cables de acero de alta resistencia, dispuestos de forma cruzada y oblicua, adheridos entre sí para formar una estructura de triángulos indeformables. Este diseño estructural combina robustez y flexibilidad, permitiendo que el neumático soporte cargas elevadas y mantenga su integridad bajo condiciones de operación



exigentes, mientras se adapta a las irregularidades del terreno. (Morales, J. 2020)

- **Aron de talón:** El aro de talón del neumático es una estructura de alambre de acero que se encuentra en la parte más interna del talón del neumático. Su función principal es proporcionar un ajuste firme y seguro entre el neumático y la llanta. El aro de talón asegura que el neumático se mantenga correctamente montado en la llanta, evitando que se deslice o se desaloje bajo condiciones de alta presión y fuerzas de operación. Este aro de acero también contribuye a la estabilidad y resistencia estructural del neumático, permitiendo una mayor durabilidad y seguridad durante el uso.
- **Revestimiento de goma interior:** La capa más interna del neumático, conocida como capa de estanqueidad o revestimiento interior, está compuesta por un material de goma diseñado específicamente para retener el aire a presión en su interior. Su función principal es garantizar la estanqueidad, evitando fugas y manteniendo la presión adecuada para un rendimiento óptimo del neumático. (Morales, J. 2020)

### 3.4.2. Tipos de neumáticos

- **Neumáticos convencionales:** Está compuesto por capas de fibras textiles de nylon o rayón, dispuestas en ángulos cruzados y unidas mediante caucho para formar una estructura diagonal. Este diseño presenta limitaciones en cuanto a su rendimiento durante el rodaje, ya que las fricciones entre las capas generan un calentamiento excesivo que afecta negativamente la eficiencia del neumático. La fuerte conexión entre el flanco y la cima también provoca una deformación particular en la superficie de contacto con el suelo, lo que reduce la adherencia y acelera el desgaste. Además, la banda de rodamiento de un neumático convencional es susceptible a perforaciones, lo que incrementa el riesgo de daño y compromete la durabilidad del neumático en condiciones exigentes. (Morales, J. 2020)
- **Neumáticos macizos:** Son compuestos de cauchos con características específicas diseñadas para proporcionar adherencia y tracción en condiciones operativas exigentes. A diferencia de los neumáticos convencionales, estos no contienen aire, por lo que se les denomina neumáticos macizos. Su principal aplicación es en maquinaria pesada como grúas horquillas, montacargas o carretillas elevadoras. Sin embargo, presentan limitaciones para uso intensivo debido al calentamiento significativo del caucho durante su funcionamiento, lo que puede generar un desgaste acelerado y riesgos de deterioro, especialmente cuando se enfrentan a obstáculos o superficies irregulares.



Bajo estas condiciones, los neumáticos macizos pueden sufrir daños estructurales, como grietas o rupturas. (Morales, J. 2020)

- Neumáticos radiales: Los neumáticos radiales combinan capas metálicas o textiles dispuestas de talón a talón, junto con una estructura de lonas de acero indeformable que refuerza la cima del neumático. Esta configuración radial reduce el roce y el consumo de energía, mejora la adherencia y disminuye el desgaste, mientras que la cintura de acero ofrece una mayor resistencia a las perforaciones.

La carcasa del neumático radial está conformada por una o más capas metálicas que se extienden desde un talón al otro. Esta disposición permite separar las funciones de la cima y los flancos, lo que optimiza el rendimiento global del neumático. Al disociar estas funciones, el neumático radial ofrece un mejor desempeño, proporcionando una mayor adherencia, minimizando el deslizamiento y reduciendo la velocidad de desgaste. La cima del neumático radial, reforzada con acero, es más resistente a los daños y perforaciones, mientras que sus flancos ofrecen una mayor seguridad, lo que hace que este tipo de neumático sea especialmente adecuado para condiciones operativas exigentes.

- Neumáticos radial tubeless: Este neumático se monta sin cámara sobre una llanta especial que cuenta con una válvula adecuada para su funcionamiento. Aunque externamente el neumático radial tubeless (sin cámara) se asemeja a un neumático tradicional tube type (con cámara), su fabricación es diferente desde el punto de vista estructural. En su interior, una capa especial de goma butílica garantiza la estanqueidad total, evitando la necesidad de una cámara de aire. Las ventajas de este diseño son considerables:
  - ◆ Se elimina el riesgo de pellizcar la cámara, un problema común en neumáticos con cámara.
  - ◆ No se acumula aire atrapado entre el neumático y la cámara, lo que mejora la eficiencia y la seguridad.
  - ◆ La pérdida de aire es más gradual, lo que elimina los desinflados repentinos; en caso de una fuga, el proceso de desinflado es lento, permitiendo tiempo suficiente para llevar el neumático al taller de reparación en lugar de realizar una reparación inmediata en el sitio.
- Según Néstor (2020) [25], los diferentes tipos de goma se clasifican según sus características de resistencia y adaptabilidad a distintas condiciones operativas:
  - ◆ Tipo A4: Goma especialmente resistente a los cortes, arrancamiento y abrasión, ideal para superficies agresivas y condiciones exigentes.



- ◆ Tipo A: Similar al Tipo A4, pero con mayor resistencia a velocidades más altas, lo que la hace más adecuada para aplicaciones que requieren desempeño a alta velocidad y resistencia adicional a cortes y abrasión.
  - ◆ Tipo B4: Goma resistente a la abrasión y al calentamiento, diseñada para suelos poco agresivos, proporcionando un buen rendimiento en condiciones de uso moderado.
  - ◆ Tipo B: Similar al Tipo B4, pero con una mayor resistencia al sobrecalentamiento en suelos poco agresivos, asegurando un rendimiento óptimo en terrenos menos exigentes.
  - ◆ Tipo C4: Este tipo de goma se adapta a altas velocidades y ciclos largos, siendo ideal para aplicaciones que requieren desempeño constante durante periodos prolongados.
  - ◆ Tipo C: Goma muy resistente al calentamiento, diseñada para soportar largos trayectos y rodaje intensivo, siendo la opción ideal para condiciones de uso prolongado y exigente.
- Según Bridgestone (2020), los neumáticos para movimiento de tierras se dividen en varias categorías, cada una diseñada para enfrentar condiciones específicas de trabajo:
- ◆ 1A (Estándar): Neumático de uso general, adecuado para condiciones de trabajo comunes sin requisitos especiales de resistencia.
  - ◆ 2A (Resistente al corte): Diseñado para ofrecer mayor resistencia a los cortes y daños, ideal para terrenos más agresivos y condiciones exigentes.
  - ◆ 3A (Resistente al calor): Neumático que proporciona mayor resistencia al calor, recomendado para operaciones en terrenos cálidos o con altas temperaturas de trabajo.

### 3.4.3. Uso de neumáticos

En el uso de neumáticos de vehículos de pasajeros [3, 4] y de carga [5], las propiedades clave son el agarre en la carretera, la estabilidad y la evacuación efectiva del agua en presencia de precipitaciones. Debido a que los tractores agrícolas [6] no tienen suspensión trasera amortiguadora, las ruedas traseras se desgastan más profundamente y rápidamente, por lo que se imponen exigencias especialmente altas a los neumáticos: se utilizan neumáticos especiales con un dibujo profundo para todo terreno. Al operar neumáticos de gran tamaño, todas las propiedades mencionadas anteriormente pasan a un segundo plano, y la resistencia al desgaste, al corte y al calor cobran protagonismo, lo que en última instancia se refleja en la vida útil de los neumáticos.

El uso eficiente de los neumáticos en camiones de minería depende de su correcta elección según las condiciones de trabajo, como la tracción, flotación,



tamaño, banda de rodadura y presión de aire. Estos neumáticos enfrentan condiciones exigentes, donde la densidad de las rocas transportadas, la carga del camión, el estado de las carreteras y el perfil de la vía afectan su durabilidad y rendimiento.

El trabajo en condiciones severas aumenta la temperatura de los neumáticos, reduciendo la resistencia del caucho y la carcasa, lo que incrementa la probabilidad de delaminación y fallos. Mantener los neumáticos dentro de sus rangos de temperatura de diseño es crucial para evitar estos problemas. [7]

Los neumáticos son un componente clave para la eficiencia de los camiones en la minería a cielo abierto, ya que su desgaste prematuro debido a las difíciles condiciones del terreno, como vías en mal estado o pendientes pronunciadas, incrementa significativamente los costos operativos. Para mitigar estos problemas, se destaca la importancia del mantenimiento preventivo, como la inspección regular de la presión y el estado de la banda de rodadura, ya que un inflado incorrecto puede aumentar el consumo de combustible y reducir la vida útil del neumático. Además, el estado de las rutas influye directamente en el desgaste, por lo que mejorar la calidad de las vías es crucial para extender la vida útil de los neumáticos. [8]

La vida útil alcanzable de los neumáticos para un camión CAEX de minería es notablemente mayor que la vida útil registrada. Esto se debe al desgaste anormal de los neumáticos o a fallos prematuros. En 2014 se determinó que el 41 % de todos los neumáticos fallaron prematuramente. [9]

Los factores que afectan la vida útil de los neumáticos incluyen [10]:

- Condiciones de la carretera (curvas, pendientes, super elevación, longitud de acarreo, superficie de la carretera y mantenimiento).
- Condiciones de operación (velocidad promedio, velocidad en curvas).
- Condiciones del camión (distribución del peso, amortiguadores, presión de aire en los neumáticos, coincidencia de neumáticos, profundidad de la banda de rodadura y tipo de neumático).
- Clima (temperatura y precipitación).

La Tabla 1 muestra valores típicos de la reducción de la vida útil de los neumáticos causada por la presión de inflado y diversas condiciones de la carretera. La presión de inflado de los neumáticos debe monitorearse regularmente, ya que puede afectar significativamente su vida útil. Circular a una velocidad compatible con el radio de la curva y la super elevación puede minimizar el daño a los neumáticos que ocurre en las curvas.





Tabla 1 Factores que afectan la vida útil promedio de los neumáticos (TLR = reducción de la vida útil de los neumáticos)

Inflation Pressure	TLR, %	Road Conditions	TLR, %
Recommended pressure	0	Average soil, no rock	0
10 % under	-10	Average soil, scattered rock	-10
20 % under	-25	Well maintained with smooth gravel	-10
30 % under	-70	Poorly maintained with ungraded gravel	-30 or more
20 % over	-10	Scattered blast rock	-40 or more
Curves	TLR, %	Grades	TLR, %
None	0	None	0
Smooth	-10	<6 %	-10
Sharp	-20 or more	<15 %	-30

Fuente: Shakenov, A., Sadkowski, A., & Stolpovskikh, I. (2022)

Los fabricantes de neumáticos compran alrededor del 70 % de la producción total. La demanda global de caucho natural ha aumentado aproximadamente un 30 % desde el año 2000. La producción de caucho se ha expandido a África en los últimos 20 años. La superficie global total utilizada para la producción de caucho ha aumentado en más de un 35 % (alrededor de 13 millones de hectáreas) [11]. A modo de referencia, el territorio de España es de 13.7 millones de hectáreas. Desafortunadamente, el crecimiento en la producción de caucho natural contribuye al proceso de deforestación. Se estima que los frentes de deforestación representarán más del 80 % de la pérdida forestal proyectada a nivel mundial para 2030, es decir, hasta 170 millones de hectáreas [12].

Más de 20 millones de toneladas de neumáticos se desechan en todo el mundo. Desafortunadamente, más del 30 % de los neumáticos fuera de carretera (OTR) de los camiones mineros se desechan antes de alcanzar su vida útil objetivo.

La mala gestión en la operación de neumáticos fuera de carretera puede causar graves accidentes de seguridad, como explosiones de neumáticos. Esto ocurre cuando una mezcla de gases volátiles en el interior del neumático se auto-enciende, generalmente a una presión superior a 1000 psi. Una explosión de neumático puede causar graves daños al equipo y a la salud del operador [13].



Una fuente alternativa de caucho natural puede ser la planta *Taraxacum kok-saghyz*, que crece ampliamente en Asia Central. Las raíces de estas plantas pueden contener hasta un 5,3 % de caucho natural [14].

La predicción de la vida útil de los neumáticos de caucho es una parte importante de los estudios de los investigadores. Se pueden utilizar enfoques de redes neuronales artificiales para predecir las propiedades de fatiga de los compuestos de caucho natural. La precisión promedio de predicción de la red neuronal artificial establecida fue del 97,3 % [15].

Los camiones de carretera son ampliamente utilizados en sitios mineros para operaciones de soporte, tales como camiones de combustible, entrega y carga de explosivos, manejo de neumáticos, camiones de servicio pesado y entrega de diversos materiales. La práctica muestra que el 80 % de los daños en los neumáticos de los camiones de carretera no son reparables [16].

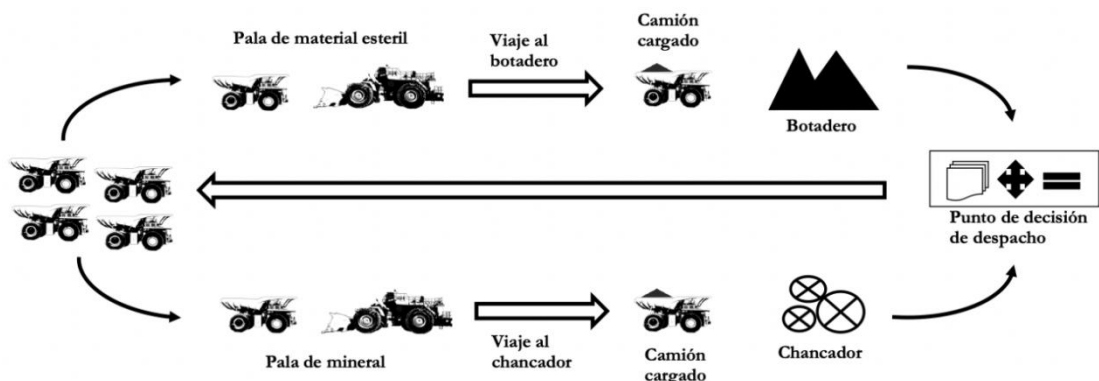
Modelar diversos escenarios de diseño de caminos de acarreo como parte del diseño de minas es bastante importante. Estos estudios se publicaron en "**Modelado numérico de caminos de transporte en minas a cielo abierto**" [17], "**Aplicación de análisis de datos avanzados para mejorar la eficiencia energética de los camiones de acarreo en minas superficiales**" [18], y "**Diseño óptimo de rampas en minas a cielo abierto**" [19].

El consumo de combustible es una de las mayores partes de los costos de transporte. La optimización de la eficiencia del combustible se muestra en publicaciones como: "**Potencia y velocidades efectivas de camiones de descarga minera en modo de economía de combustible**" [20] y "**Modelo de eventos discretos para simular el efecto de la acumulación de camiones debido a la variación de carga en el tiempo de ciclo, materiales transportados y consumo de combustible**" [21].

En Chile, el sector minero del cobre es uno de los más grandes a nivel mundial. En sus faenas se emplean una gran cantidad de camiones de alto tonelaje para la extracción de mineral. Estos camiones son cargados generalmente por palas mecánicas y transportan el material valioso hacia las plantas de chancado, lugar donde se reduce el tamaño para así continuar con diferentes procesos que son necesarios para la obtención de cátodos o concentrado de cobre (imagen 1). [32]

Por otro lado, el material que se considera sin valor económico es transportado a botaderos.

Imagen 3. Esquema de funcionamiento de la extracción de material de una mina



Fuente: Revista minera Crisol (2021)

El mercado global de neumáticos para camiones mineros está liderado por fabricantes como Bridgestone y Michelin, quienes no solo suministran sus productos, sino que también brindan asesoramiento técnico a las distintas faenas mineras sobre su uso y rendimiento óptimo.

Una recomendación común de estos proveedores es que un neumático nuevo opere durante el primer tercio de su vida útil en las posiciones delanteras del camión, para luego trasladarse a las posiciones traseras durante los dos tercios restantes. Esta estrategia se fundamenta en la necesidad de maximizar el aprovechamiento del producto, considerando que las condiciones de operación varían según la posición: los neumáticos delanteros soportan aproximadamente el doble del peso en comparación con los traseros.

Los neumáticos utilizados en minería, comúnmente conocidos como “off-the-road” (OTR) o neumáticos para terrenos difíciles y movimiento de tierra, representan una inversión considerable para cualquier operación. Al igual que cualquier otra inversión, requieren un mantenimiento adecuado durante su uso para garantizar la máxima productividad y optimizar el retorno económico. [33]

Aunque el enfoque hacia los neumáticos como producto ha evolucionado en los últimos años, las necesidades y exigencias de las operaciones mineras han permanecido prácticamente sin cambios. [33]

#### 3.4.4. Posición de los neumáticos OTR en camiones CAEX

Un neumático con un tamaño de 59/80R63 (neumático que será estudiado más adelante), esta fabricado para camiones de extracción (CAEX) con capacidad de carga de 360 toneladas, estos neumáticos miden sobre 4 metros de diámetro, con un ancho de 1.5 metros y pesan alrededor de 5.5 toneladas.



En la siguiente imagen 4 se puede diferenciar el tamaño del neumático de dichas dimensiones y el de una persona junto a este.

Imagen 4. Neumático minero OTR



Fuente: Kevin, J (2022)

Cada vehículo de extracción minera está equipado con seis neumáticos OTR (Off-the-Road), distribuidos de la siguiente manera: dos neumáticos en el eje delantero y cuatro neumáticos en el eje trasero. Las posiciones de los neumáticos en los ejes se identifican mediante una numeración del 1 al 6, asignada de izquierda a derecha, comenzando por el eje delantero y seguido del eje trasero, tal como se detalla en la Imagen 5.

La identificación numérica de las posiciones de los neumáticos es crucial para la correcta ejecución de la rotación de neumáticos, así como para el monitoreo preciso de parámetros como temperatura, presión y vida útil. Esta práctica permite un control exhaustivo sobre el rendimiento de los neumáticos, optimizando su ciclo de vida y garantizando la seguridad y eficiencia operativa del equipo en las condiciones exigentes del entorno minero. (Kevin, J. 2022)

Imagen 5. Posicionamiento de neumáticos OTR



Fuente: Kevin, J (2022)

### 3.5. LAS ZIRH

LAS ZIRH es un fabricante de cadenas de protección para neumáticos en sus plantas con procesos que incluyen forja, soldadura, tratamiento térmico, fabricación de moldes, control de calidad y empaque, tanto en Estambul como en Ankara, Turquía. Todo esto bajo su propia marca (registrada), patentes, derechos de diseño industrial e ingeniería, cumpliendo con los estándares de calidad EN – TSE 663 y la Norma de Calidad ISO 9001.

En la actualidad, LAS ZIRH cuenta con dos plantas de producción, una en Hadımköy, Estambul, y otra en Kırıkkale, Ankara. [34]

Esta empresa se ha posicionado entre las tres principales empresas fabricantes de cadenas de protección para neumáticos exportando a más de 70 países en 5 continentes. Es el primer y más exitoso fabricante en la región. [34]

Tienen a más de 4.000 clientes que usan sus cadenas en minería a cielo abierto y subterránea, túneles, canteras, reciclaje, plantas de cemento, silvicultura, movimiento de tierras, operaciones con desechos calientes, chatarra, trabajos en metal, vidrio y eliminación de nieve. [34]

LAS ZIRH fabrica cadenas de protección para neumáticos en una amplia gama de tamaños y estilos, compatibles con todo tipo de llantas. Estas cadenas están disponibles en medidas de 12, 14, 16, 18, 20, 22 y 23 mm, con diseños en patrones cuadrados, hexagonales y decagonales. [34]



La compañía dispone de un departamento logístico propio que se encarga del empaquetado y transporte de las cadenas y sus piezas de repuesto, asegurando el cumplimiento de las normativas de la Unión Europea (UE) y del ISPM. Asimismo, mantiene un abastecimiento constante en sus almacenes situados en Estambul, Ankara y Estados Unidos. [34]

### 3.5 Camiones CAEX Komatsu 980E

#### 3.5.1 Motor

- Marca y Modelo: Komatsu SSSDA18V170
- Combustible: Diesel
- Número de cilindros: 18
- Ciclos de operación 4 tiempos
- Potencia bruta: 2610 kW 3500 HP @ 1800 rpm
- Potencia neta del volante: 2495 kW 3346 HP @ 1800 rpm
- Peso (húmedo): 11750 kg --- 25897 lbs
- Peso (seco): 11250 -- 24795 lbs

Fuente: (Komatsu 980E Ficha técnica & Especificaciones 2019-2024)

#### 3.5.2 Tracción Eléctrica

- Alternador: GTA-39
- Soplador principal de doble ventilador: 340 m<sup>3</sup>/min 12,000 cfm
- Control: Sistema de control de torque AC
- Ruedas motorizadas\*: GDY108-C Motores de tracción por inducción
- Relación: 35.02:1
- Velocidad (máxima): 64 km/h 40 mph

Nota: El rendimiento del sistema de tracción depende del peso bruto del vehículo, pendiente de la carretera, longitud de la ruta de acarreo, resistencia al rodado y otros parámetros. Komatsu debe analizar cada condición de trabajo para garantizar una aplicación adecuada.

Fuente: (Komatsu 980E Ficha técnica & Especificaciones 2019-2024)



### 3.5.3 Cabina

- Entorno avanzado para el operador con estructura integral ROPS/FOPS de 4 postes, Nivel 2 (ISO 3449), asiento ajustable con suspensión de aire con soporte lumbar y reposabrazos, asiento para pasajero de tamaño completo, aislamiento máximo con valor R, columna de dirección inclinable y telescópica, limpiaparabrisas eléctricos con lavador, vidrio de seguridad tintado, ventanas eléctricas, medidor de carga útil IV, calefactor y desempañador de 55,000 Btu/hr, aire acondicionado de 21,600 Btu/hr (refrigerante HFC-134A).

Fuente: (Komatsu 980E Ficha técnica & Especificaciones 2019-2024)

### 3.5.4 Suspensión

Sistema hidroneumático de tasa variable con control de rebote integrado:

- Máximo recorrido delantero: 303 mm (11.92")
- Máximo recorrido trasero: 239 mm (9.40")
- Máxima oscilación del eje trasero:  $\pm 6.5^\circ$

Fuente: (Komatsu 980E Ficha técnica & Especificaciones 2019-2024)

### 3.5.5 Bastidor

Tecnología avanzada, bastidor tipo escalera con secciones de acero totalmente soldadas, con protección ROPS integrada, parachoques frontal, travesaños de acero tubular traseros, piezas fundidas en todas las zonas críticas de transición y zonas de alta tensión, y soldaduras continuas sin costuras.

Material de las placas:

- Resistencia a la tracción: 482.6 MPa / 70,000 psi

Material de fundición:

- Resistencia a la tracción: 620.5 MPa / 90,000 psi

Dimensiones:

- Ancho del riel: 305 mm / 12"
- Profundidad del riel (mínima): 305 mm / 12"
- Grosor de las placas superior e inferior: 45 mm / 1.77"
- Grosor de las placas laterales: 25 mm / 0.98"
- Grosor del área de montaje del eje motriz: 32 mm / 1.26"



Alineación del eje motriz: Alineación oscilante entre el bastidor y el eje.

Fuente: (Komatsu 980E Ficha técnica & Especificaciones 2019-2024)

### 3.5.6 Carrocería

Carrocería de acero completamente soldada con refuerzos horizontales y techo completo. Los montajes de goma en el bastidor, el volquete y el cuerpo de descarga son estándar. Se pueden agregar como opcionales el toldo extendido y el sistema de escape pivotante con calefacción.

- Grosor de los componentes:
  - ◆ Suelo: 16 mm / 0.63" (exterior)
  - ◆ Resistencia a la tracción: 1379 MPa / 200,000 psi
- Placa frontal:
  - ◆ Exterior: 10 mm / 0.39"
  - ◆ Centro: 12 mm / 0.47"
- Placa lateral: 10 mm / 0.39"
- Techo de la carrocería: 6 mm / 0.24"
- Resistencia a la tracción del acero SAE templado (2:1): 690 MPa / 100,000 psi

Volumen estándar del volquete de Komatsu: 250 m<sup>3</sup> / 327 yd<sup>3</sup>

Peso estándar de la carrocería Komatsu: 47,131 kg / 92,000 lb

Fuente: (Komatsu 980E Ficha técnica & Especificaciones 2019-2024)

### 3.5.7 Sistema de Frenos

- Frenos de servicio: Frenos de discos múltiples, hidráulicos, enfriados por aceite.
- Sistema de tracción: Embrague deslizante.
- Presión máxima del sistema de frenado: 19,000 kPa / 2,750 psi
- Área total de fricción por eje: 10,372 cm<sup>2</sup> / 1,608 in<sup>2</sup>
- Freno de aparcamiento: Frenos de discos múltiples, accionados por resorte y liberados hidráulicamente, integrados en cada motor del eje.

Potencia dinámica eléctrica de frenado: 4476 kW / 6,000 hp

Fuente: (Komatsu 980E Ficha técnica & Especificaciones 2019-2024)





### 3.5.8 Sistema de enfriamiento

Radiador con núcleo reemplazable, sistema dividido y tanque de desaireación en la parte superior.

- Área frontal del radiador: 7.02 m<sup>2</sup> / 75.5 ft<sup>2</sup>

Fuente: (Komatsu 980E Ficha técnica & Especificaciones 2019-2024)

### 3.5.9 Capacidades de relleno de servicio

- Sistema de enfriamiento: 719 L / 190 galones
- Cáster\*: 341 L / 90 galones
- Sistema hidráulico\*\*: 1325 L / 350 galones
- Caja de engranajes del motor (cada una): 95 L / 25 galones
- Tanque de combustible (sin emisiones): 5300 L / 1400 galones
- Tanque de combustible (Tier IV): 4543 L / 1200 galones
- Tanque de DEF: 318 L / 84 galones

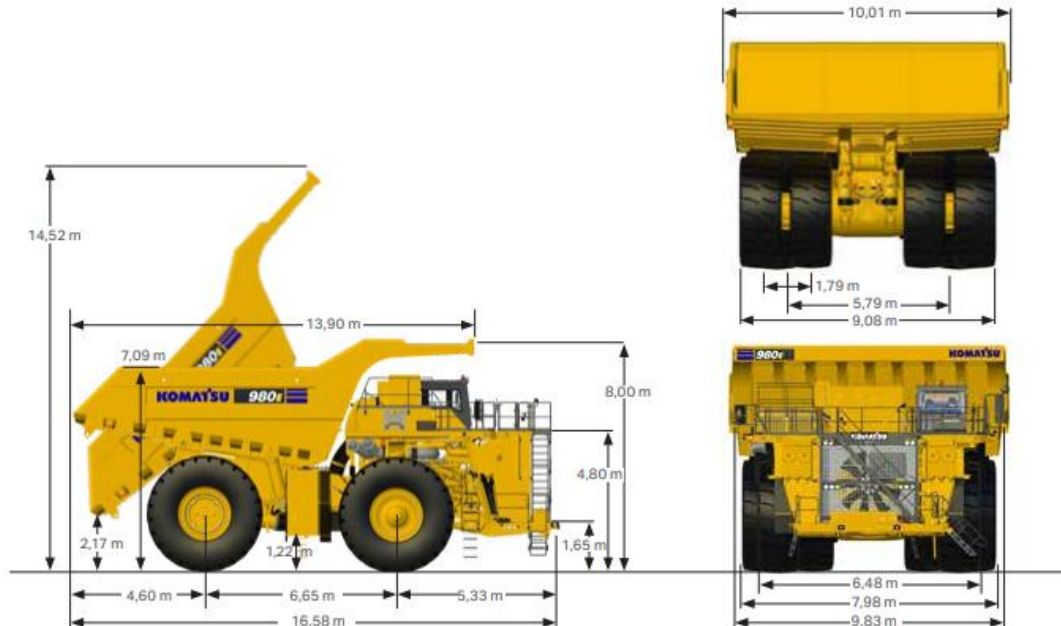
\*Incluye filtros de aceite lubricante.

\*\* Incluye tanque.

Fuente: (Komatsu 980E Ficha técnica & Especificaciones 2019-2024)

### 3.5.10 Dimensiones

Imagen 6. Dimensiones CAEX Komatsu 980E



Fuente: Komatsu 980E Ficha técnica & Especificaciones (2019-2024)

### 3.5.11 Sistema hidráulico

- Dirección: Dirección asistida por acumuladores con cilindros de doble acción que proporcionan dirección constante. La dirección secundaria es automáticamente suministrada por el acumulador.
- Diámetro de giro (SAE): 32 m / 105'
- Depósito: Capacidad: 947 L / 250 gal
- Filtración:
  - ◆ Elementos reemplazables en línea.
  - ◆ Succión: un filtro, tamaño de malla de 100 micrones.
- Izaje y dirección:
  - ◆ Bomba dual en línea de alta presión.
  - ◆ Gabinete de componentes del freno: accesible desde la cubierta superior, con conexiones de prueba de diagnóstico.



- Izaje: Sistema de dos etapas con cilindros de doble acción, válvula de cojín interna y amortiguación en el centro.
- Tiempos de izaje
  - ◆ Levantar con carga: 21 segundos
  - ◆ Bajar (baja velocidad): 16 segundos
  - ◆ Flotación al bajar (velocidad baja): 17 segundos
- Bombas:
  - ◆ Izaje y enfriamiento de frenos: Paquete de dos bombas en línea.
  - ◆ Izaje y dirección de frenos:
    - ✧ Bomba tándem compensada por presión.
    - ✧ Salida: 246 lpm (65 gpm) a 1900 rpm y 18960 kPa (2750 psi)
- Presiones de alivio del sistema
  - ◆ Enfriamiento de izaje y frenos: 17237 kPa (2500 psi)
  - ◆ Dirección y frenos: 20685 kPa (3000 psi)

Puertos disponibles para alimentación de camiones deshabilitados y para diagnósticos del sistema.

Fuente:(Komatsu 980E Ficha técnica & Especificaciones 2019-2024)

### 3.6. Índice de ASARCO

El índice de ASARCO o norma ASARCO constituye el marco de referencia empleado para definir conceptos y distribuir los tiempos involucrados en las operaciones del equipo. Esta norma, que presenta la estructura detallada en la imagen 7, es esencial para el monitoreo de los tiempos asociados con los equipos de servicio, particularmente aquellos utilizados en el mantenimiento de caminos mineros. (Morales, J. 2020)

Según el documento de directrices de reportabilidad de tiempos e índices para equipos mineros del Grupo AMSA, tiene como objetivo principal garantizar una imputación precisa de los tiempos en la flota de equipos. Describe los criterios y metodologías necesarias para una correcta asignación de los tiempos, con un enfoque especial en los equipos de carguío, transporte y perforación. De este modo, facilita la transferencia de buenas prácticas operativas entre las distintas compañías del grupo minero, optimizando la eficiencia en las operaciones mineras y manteniendo estándares de calidad en los procesos. (Morales, J. 2020)

Imagen 7. Índice de ASARCO o Norma ASARCO



Fuente: Morales, J (2020)

- **Tiempo Nominal:** Es un concepto clave utilizado para definir y gestionar los tiempos estándar o de referencia que se asignan a las diferentes actividades y procesos dentro de la operación minera. Este tiempo se establece a partir de un análisis detallado de las condiciones operativas, las características de los equipos y los procesos involucrados, y se utiliza como una medida base para la planificación y monitoreo de la productividad.(Morales, J. 2020)
- **Tiempo Disponible:** Tiempo en que el equipo se encuentra operativamente disponible y en condiciones óptimas para desempeñar su función conforme a las especificaciones.(Morales, J. 2020)
- **Tiempo Operativo:** Tiempo en que el equipo se encuentra en condiciones operativas (con el operador asignado), ejecutando las actividades previstas dentro del ciclo de trabajo, conforme a los requerimientos de la operación minera (carguío, transporte o perforación).(Morales, J. 2020)

Esta norma también establece subclasificaciones específicas de tiempos, mediante las cuales se busca reflejar el estado operativo del equipo, con el objetivo de gestionar de manera proactiva las actividades asociadas, optimizando su rendimiento y eficiencia en las operaciones mineras. A continuación se detallaran y definirán dichas subclasificaciones:

- **Mantenimiento:** Tiempo en el que un equipo no se encuentra disponible para su uso, debido a un mantenimiento programado o no programado.
- **Reserva:** Tiempo en el que un equipo se encuentra mecánicamente operable para el cumplimiento de sus funciones, pero no posee operador asignado, no es requerido para la operación o se encuentra bajo condiciones donde no pueda ser operado.(Morales, J. 2020)
- **Demoras Programadas:** Tiempo en el que un equipo no cumple sus funciones debido a actividades previamente programadas.(Morales, J. 2020)



- Demoras No Programadas: Tiempo en el que un equipo no puede cumplir con sus funciones debido a actividades imprevistas, donde no se sabe su duración con certeza. (Morales, J. 2020)
- Pérdidas Operacionales: Tiempo en el que un equipo no cumple con sus funciones debido a interferencias o problemas en su ciclo de trabajo ocasionados por accidentes o condiciones externas en la operación. (Morales, J. 2020)

### 3.6.1. Formulas indice de ASARCO

- Disponibilidad: Es el porcentaje de horas nominales en las que la flota o equipo se mantuvo en condiciones operativas mecánicas y/o eléctricas, aptas para su funcionamiento sin restricciones. Este índice define el parámetro de disponibilidad operativa, estableciendo el marco de referencia técnico que la operación deberá cumplir para garantizar una performance óptima y continua en las actividades mineras. (Morales, J. 2020)

$$\text{Disponibilidad (\%)} = \frac{\text{Tiempo Disponible}}{\text{Tiempo Nominal}} * 100$$

Ecuación 1. Disponibilidad ASARCO (Morales, J. 2020)

- Utilización Efectiva (UE): Porcentaje de horas disponibles en que la flota o un equipo se encuentra operando de manera efectiva. (Morales, J. 2020)

$$\text{Utilización Efectiva (\%)} = \frac{\text{Tiempo Efectivo}}{\text{Tiempo Disponible}} * 100$$

Ecuación 2. Utilización Efectiva ASARCO (Morales, J. 2020)

- Eficiencia Operacional (%): Porcentaje de horas efectivas en la que una flota o un equipo se encuentra operando respecto al total de las horas horómetro, esto nos informa sobre la eficiencia operacional del proceso. (Morales, J. 2020)

$$\text{Eficiencia Operacional (\%)} = \frac{\text{Tiempo Efectivo}}{\text{Horas Horómetro}} * 100$$

Ecuación 3. Eficiencia Operacional ASARCO (Morales, J. 2020)



- Rendimiento Efectivo: Mide el desempeño productivo, se mide en toneladas o metros por hora efectiva. (Morales, J. 2020)

$$\text{Rendimiento Efectivo} = \frac{\text{Desempeño Productivo}}{\text{Tiempo Efectivo}} * 100$$

Ecuación 4. Rendimiento Efectivo ASARCO (Morales, J. 2020)

### 3.6.2. Criterio ASARCO

- Tiempo Efectivo: Es definido por el ciclo de trabajo de una flota o equipo, compuesto por diferentes actividades para las flotas de equipos. (Morales, J. 2020)
- Demoras Programadas y No Programadas: Son identificadas al instante en que comienza o se registra una acción la cual interrumpe los ciclos de trabajo de un equipo o flota, lo que provoca una ineficiencia. (Morales, J. 2020)
- Reservas: Se registran en el momento en que un equipo no cuenta con operador, también cuando termina su ciclo de trabajo y no hay una nueva asignación para el equipo o cuando existe una condición en la cual el equipo no puede ser operado como por ejemplo: mal clima. (Morales, J. 2020)
- Mantenimiento Programado: El traslado y entrega en el área de mantenimiento se gestionará bajo el estado de "demora no programada", debido al traslado. El estado se actualizará a "mantenimiento" en el instante en que el equipo sea recibido para su reparación o revisión en el taller. Posteriormente, la entrega del equipo a operaciones y su retorno al área minera se procesará bajo el estado de "demora no programada" hasta su reincorporación a la operación. (Morales, J. 2020)
- Mantenimiento No Programado: La actividad de mantenimiento no programado se registrará en el momento en que el equipo genere la alerta o se identifique la falla. Las horas de inactividad serán imputadas a las horas disponibles hasta que el equipo sea entregado nuevamente a operaciones. (Morales, J. 2020)



### 3.7. CAPM y WACC

El Costo Promedio Ponderado de Capital (WACC, por sus siglas en inglés), es una herramienta fundamental utilizada por analistas e inversores para evaluar la viabilidad financiera de una empresa y tomar decisiones de inversión informadas. [44]

#### 3.7.1 Concepto WACC

El WACC es una métrica financiera que representa el costo promedio de capital para una empresa. Considera el costo tanto de la deuda como del financiamiento por acciones y calcula el promedio ponderado de estos costos en función de la proporción de cada uno en la estructura de capital de la empresa. El WACC se expresa como un porcentaje y se utiliza como tasa de descuento en diversos análisis financieros, como valoraciones y presupuestos de capital. [44]

#### 3.7.2 Componentes WACC

El Costo Promedio Ponderado de Capital (WACC, por sus siglas en inglés) está constituido por dos componentes principales: el costo de la deuda y el costo del capital propio. El costo de la deuda corresponde al desembolso asociado al servicio de los intereses sobre las obligaciones financieras vigentes de la empresa. Este se determina en función de la tasa efectiva aplicada a los instrumentos de deuda, considerando variables como el perfil de riesgo crediticio de la organización y las condiciones prevalecientes en el mercado financiero. [44]

Por otro lado, el costo del capital propio representa la rentabilidad esperada por los accionistas que aportan recursos financieros a la empresa. Este componente se estima considerando la tasa de rendimiento libre de riesgo, el coeficiente beta de la empresa, que mide su exposición al riesgo sistemático, y la prima de riesgo del capital, la cual refleja la compensación exigida por los inversionistas por asumir riesgos adicionales en comparación con inversiones libres de riesgo. [44]

#### 3.7.3 Importancia del WACC en un análisis financiero

El Costo Promedio Ponderado de Capital constituye una herramienta fundamental en el análisis financiero por diversas razones. En primer lugar, permite identificar la rentabilidad mínima que una empresa debe alcanzar para cubrir sus costos de capital. Cuando una empresa no logra generar retornos que superen su WACC, enfrenta el riesgo de perder atractivo ante



los inversionistas y de no estar generando valor para sus accionistas, lo cual podría comprometer su sostenibilidad financiera a largo plazo. [44]

En segundo lugar, el WACC se emplea como una herramienta clave para la valoración de empresas mediante el descuento de sus flujos de efectivo proyectados. Al utilizar el WACC como tasa de descuento, se obtiene el valor presente neto de dichos flujos, incorporando el perfil de riesgo de la empresa y proporcionando una estimación realista de su rentabilidad futura. Esta metodología permite a los analistas evaluar el desempeño financiero de la compañía y su capacidad para generar valor en el tiempo. [44]

Por último, el WACC es una herramienta esencial para determinar la estructura de capital óptima de una empresa. Al evaluar el costo relativo de la deuda y del capital propio, la administración puede tomar decisiones estratégicas e informadas sobre la proporción adecuada de financiamiento entre estos componentes. Esto permite optimizar el costo total de capital, maximizando el valor de la empresa y asegurando una asignación eficiente de recursos en sus operaciones e inversiones. [44]

### **3.7.4 Como calcular WACC paso a paso**

#### **3.7.4.1 Costo capital propio**

El costo del capital propio se determina mediante el Modelo de Fijación de Precios de Activos de Capital (CAPM, por sus siglas en inglés), el cual incorpora tres variables clave: la tasa libre de riesgo, el beta de la empresa y la prima de riesgo del capital propio. La tasa libre de riesgo refleja el rendimiento esperado de una inversión exenta de riesgo, como los bonos soberanos. El beta de la empresa cuantifica su sensibilidad a las fluctuaciones del mercado, capturando el riesgo sistemático al amplificar los movimientos del mercado general. Por último, la prima de riesgo del capital propio representa la compensación exigida por los inversionistas para asumir el riesgo adicional inherente al capital propio, en contraste con las inversiones sin riesgo. Al integrar estas variables, el CAPM permite calcular de manera precisa el costo del capital propio, esencial para la evaluación financiera y estratégica. [44]

#### **3.7.4.2 Costo de la Deuda**

El costo de la deuda se calcula considerando la tasa de interés promedio que una empresa paga por sus obligaciones financieras, o bien mediante el rendimiento de bonos comparables en el mercado. Para estimarlo de manera precisa, es fundamental evaluar factores como las calificaciones crediticias de la empresa, las condiciones del mercado financiero y su salud económica. Además, es crucial tener en cuenta que los gastos por intereses son





deducibles de impuestos, lo que reduce el costo efectivo de la deuda, generando un beneficio fiscal para la empresa. Este ajuste por efectos fiscales es clave para determinar el costo real que la empresa incurre por el financiamiento mediante deuda. [44]

### **3.7.4.3 Proporciones Deuda y Capital Propio**

Consiste en determinar la proporción de deuda y capital propio en la estructura de capital de la empresa. Esto se realiza dividiendo el valor de mercado de cada componente entre el valor total de mercado de la deuda y el capital propio de la empresa. Esta operación permite obtener los pesos relativos de cada fuente de financiamiento, los cuales son esenciales para calcular el Costo Promedio Ponderado de Capital (WACC). Los pesos reflejan la contribución de cada componente al financiamiento total de la empresa, facilitando así una estimación precisa de su costo de capital global. [44]

### **3.7.5 Interpretación WACC**

#### **3.7.5.1 WACC Alto**

Un WACC elevado señala que la empresa enfrenta un mayor costo de capital, lo que implica que debe generar rendimientos superiores para justificar sus inversiones y cubrir sus costos financieros. Este fenómeno puede reflejar un perfil de riesgo elevado, posibles dificultades para acceder a fuentes de financiamiento a tasas competitivas o una estructura de capital subóptima. Además, un WACC alto influye negativamente en la valoración de la empresa, ya que implica una tasa de descuento más alta al calcular el valor presente de los flujos de efectivo proyectados, lo que reduce su valoración global. [44]

#### **3.7.5.2 WACC Bajo**

Un WACC bajo sugiere que la empresa tiene un costo de capital reducido, lo que implica que puede generar valor con un nivel de riesgo relativamente menor. Un WACC bajo puede ser indicativo de una calificación crediticia favorable, operaciones eficientes o una estructura de capital sólida y bien optimizada. No obstante, es importante analizar cuidadosamente un WACC extremadamente bajo, ya que podría ser el resultado de supuestos excesivamente optimistas o cálculos imprecisos, los cuales podrían distorsionar la evaluación financiera de la empresa. [44]



### 3.7.6 Uso del WACC en el presupuesto de capital

Al analizar inversiones potenciales, los analistas comparan el rendimiento esperado de la inversión con el WACC de la empresa. Si el rendimiento esperado supera el WACC, la inversión se considera atractiva y tiene el potencial de generar valor para la empresa. En cambio, si el rendimiento esperado es inferior al WACC, la inversión podría no ser rentable, ya que no cubriría adecuadamente el costo de capital y no contribuiría al valor a largo plazo de la organización. [44]

### 3.7.7 WACC y tasa de descuento

El WACC se utiliza como la tasa de descuento al calcular el valor presente de los flujos de efectivo proyectados. Al aplicar el WACC para descontar los flujos de efectivo futuros, los analistas pueden determinar el valor justo de una inversión o evaluar el valor de una empresa, teniendo en cuenta el perfil de riesgo inherente y el costo de capital asociado. Este enfoque proporciona una estimación precisa de la rentabilidad de la inversión en función de las expectativas del mercado y las condiciones financieras de la empresa. [44]

### 3.7.8 Suposiciones cálculo WACC

El cálculo del WACC requiere realizar diversas suposiciones, tales como la estructura de capital de la empresa, el costo de la deuda y el costo del capital propio. Estas suposiciones están sujetas a variaciones a lo largo del tiempo, lo que puede influir en la exactitud del WACC calculado. Dado que las condiciones del mercado, la situación financiera de la empresa y su perfil de riesgo pueden cambiar, es crucial revisar y actualizar periódicamente estas suposiciones para garantizar que el cálculo del WACC siga siendo relevante y refleje las condiciones actuales de la empresa y su entorno económico. [44]

### 3.7.9 WACC y evaluación de riesgo

Aunque el WACC refleja el perfil de riesgo financiero de una empresa, no captura todos los tipos de riesgo que pueden afectar su rendimiento. Por ejemplo, el WACC no considera los riesgos geopolíticos, los riesgos específicos de la industria ni los riesgos operativos o estratégicos particulares de la empresa. Estos factores pueden tener un impacto significativo en el desempeño financiero y en la viabilidad de las inversiones. Para mitigar esta limitación, los analistas suelen complementar el cálculo del WACC con evaluaciones adicionales de riesgo, tales como el análisis de escenarios, el riesgo específico del proyecto o la evaluación de factores macroeconómicos que podrían influir en la empresa. [44]



### 3.7.10 Concepto CAPM

El Modelo de Fijación de Precios de Activos de Capital (CAPM, por sus siglas en inglés) es un modelo fundamental en la valoración de activos financieros, utilizado para calcular la tasa de retorno esperada de un activo en función del riesgo inherente a su inversión. El CAPM establece una relación directa entre el riesgo sistemático, medido por el coeficiente beta de un activo, y la rentabilidad esperada, que se compensa con una prima de riesgo sobre la tasa libre de riesgo. Esta relación es crucial para determinar el precio de un activo financiero, ya que establece una expectativa de retorno ajustada por el riesgo, permitiendo a los inversores tomar decisiones informadas al evaluar oportunidades de inversión. (UNIR. 2023)

El modelo CAPM fue desarrollado por el economista estadounidense William Sharpe, quien recibió el Premio Nobel de Economía en 1990, junto a Merton Miller y Harry Markowitz, por sus contribuciones a la teoría de la economía financiera.

El CAPM es un modelo teórico que parte de diversas suposiciones clave, tales como:

- El mercado está en equilibrio, con una oferta de activos financieros igual a la demanda, y tanto la oferta como la demanda son fijas y conocidas.
- Se asume que todos los inversores tienen aversión al riesgo y poseen la misma información disponible.
- La rentabilidad de los activos sigue una distribución normal.
- Solo se considera el riesgo sistemático o de mercado, excluyendo el riesgo específico de cada activo.

A pesar de estas limitaciones, el modelo es ampliamente utilizado debido a su simplicidad y la valiosa información que proporciona sobre el comportamiento de los activos financieros.

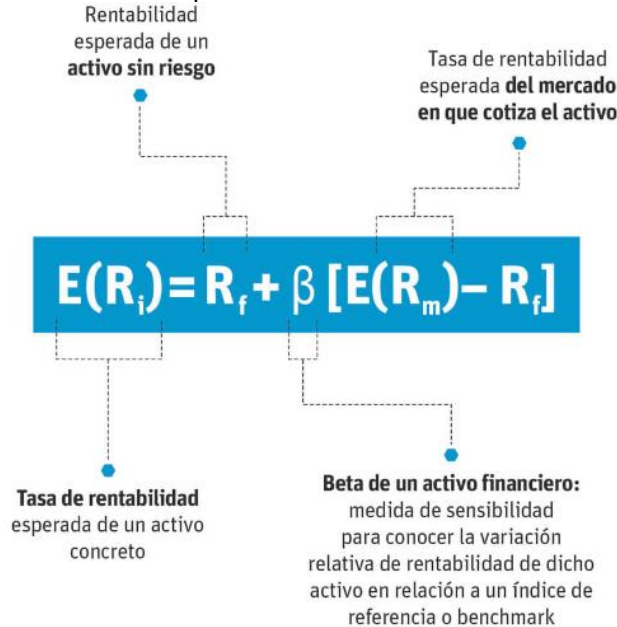
Se puede concluir del CAPM que, a mayor riesgo asumido, mayor será la rentabilidad esperada de un activo. Si se pudiera medir con precisión el nivel de riesgo asociado a un activo, sería posible determinar de manera exacta el porcentaje de rentabilidad potencial que dicho activo podría ofrecer.



### 3.7.11 Como calcular CAPM

El CAPM, desarrolla la siguiente fórmula para el cálculo de la rentabilidad de un activo:

Ecuación 5. Fórmula para calcular la rentabilidad de un activo



Fuente: UNIR. (2023)

Donde:

- $E(r_i)$ : Tasa de rentabilidad esperada de un activo
- $r_f$ : Rentabilidad esperada de un activo sin riesgo
- $\beta$  o Beta: La medida de sensibilidad que permite conocer la variación relativa de la rentabilidad de un activo financiero en relación con un índice de referencia o benchmark. Este coeficiente mide el riesgo sistemático de un activo, es decir, cómo se mueve el precio de ese activo en comparación con el movimiento del mercado en general, representado por el índice de referencia, como un índice bursátil.
- $E(r_m)$ : Tasa de rentabilidad esperada del mercado en que se cotiza el activo

Se destaca que, cuanto más alto sea Beta, mayor será el riesgo que asume el activo, es decir, la rentabilidad esperada del activo, será determinada por el valor de Beta, lo que sirve para medir el riesgo sistemático:

- Beta es mayor a 1 ( $\beta > 1$ ), el activo tiene un riesgo más alto que el del mercado.
- Beta es menor a 1 ( $\beta < 1$ ), el activo tiene un riesgo menor que el del mercado.



- Beta es igual a 1 ( $\beta = 1$ ), el activo tiene un riesgo igual al del mercado.

La fórmula se descompone para diferenciar dos factores:

- $r_m - r_f$ : Riesgo que se asocia al mercado donde el activo es cotizado  
➤  $r_i - r_f$ : Riesgo que se asocia al activo



## 4. Problema, Solución

### 4.1 Problema

En la minería a cielo abierto, el desgaste prematuro de los neumáticos OTR (Off-the-Road) en camiones de extracción (CAEX) constituye un desafío crítico para la operatividad de las flotas y la sostenibilidad económica de las operaciones. Este problema es el resultado de una combinación compleja de factores, entre los que se destacan: la exposición constante a terrenos rocosos y altamente abrasivos, condiciones climáticas extremas como altas temperaturas y humedad, inflado inadecuado, deficiencias en el mantenimiento preventivo, ciclos operativos prolongados y agresivos, cortes y daños estructurales en la banda de rodadura, así como el diseño y estado de las vías de acarreo.

Estas variables no solo afectan la vida útil de los neumáticos, sino que también incrementan los costos operativos al reducir la disponibilidad de los equipos, aumentar los tiempos de inactividad y generar riesgos de seguridad. Además, la falta de gestión adecuada de estos factores amplifica el impacto ambiental asociado al desecho de neumáticos, lo que añade presión sobre las operaciones para implementar prácticas más sostenibles. Por lo tanto, abordar esta problemática requiere un enfoque integral que considere tanto los aspectos técnicos y operativos como los económicos y ambientales.

### 4.2 Solución

Para abordar el desgaste prematuro de los neumáticos OTR en las operaciones, se propone un conjunto de soluciones innovadoras y tecnológicamente avanzadas que buscan optimizar la gestión de estos componentes críticos. Estas soluciones están diseñadas para mitigar los factores que contribuyen al desgaste excesivo, mejorar la sostenibilidad de las operaciones y reducir los costos asociados. A continuación, se describen las principales propuestas:

1. Cadenas de Protección para Neumáticos Las cadenas de protección se presentan como una medida eficaz para minimizar el impacto de los terrenos rocosos y abrasivos sobre los neumáticos. Estas cadenas, fabricadas con materiales de alta resistencia, actúan como una barrera entre el neumático y el terreno, distribuyendo las cargas y reduciendo los cortes, perforaciones y daños estructurales. Su implementación es especialmente beneficiosa en operaciones donde los caminos presentan características altamente agresivas, lo que permite prolongar significativamente la vida útil de los neumáticos y optimizar los costos operativos.



2. Sistemas de Monitoreo de Presión y Temperatura El uso de sistemas de monitoreo en tiempo real es clave para detectar y prevenir condiciones que puedan acelerar el desgaste de los neumáticos. Estos sistemas están equipados con sensores avanzados que miden parámetros críticos como la presión de inflado, la temperatura interna y el desgaste de la banda de rodadura. La información recopilada se analiza en tiempo real, permitiendo a los operadores tomar decisiones inmediatas para ajustar las condiciones operativas, prevenir fallos catastróficos y garantizar un mantenimiento más eficiente.

3. Implementación de Inteligencia Artificial (Pitcrew AI): Pitcrew AI es una solución basada en inteligencia artificial que optimiza la gestión de neumáticos a través del análisis de datos históricos y en tiempo real. Este sistema identifica patrones de desgaste y prevé condiciones de falla antes de que ocurran, lo que facilita la planificación del mantenimiento predictivo. Además, proporciona recomendaciones operativas, como ajustes en las rutas de acarreo o cambios en las velocidades de operación, para minimizar el impacto sobre los neumáticos. Esta herramienta no solo mejora la eficiencia operativa, sino que también reduce costos y maximiza la productividad de las flotas.

Estas propuestas representan una solución integral que responde directamente a la problemática del desgaste prematuro de neumáticos, proporcionando beneficios técnicos, económicos y ambientales que fortalecen la sostenibilidad y competitividad de las operaciones mineras.



---

## 5. Objetivos

### 5.1. General

- I. Realizar un estudio de prefactibilidad un sistema de control para optimizar costos operacionales de carguío y transporte de División Gabriela Mistral, alineado con las estrategias de la empresa, evaluar y económica para mejorar la eficiencia operativa.

### 5.2. Especificos

- I. Identificar las variables que influyen en el desgaste de los neumáticos en camiones mineros (CAEX), considerando factores operacionales, ambientales y de diseño que afectan su durabilidad.
- II. Analizar y clasificar las variables críticas que afectan el desgaste de los neumáticos de camiones CAEX en minería, identificando riesgos significativos con impacto económico, operativo y ambiental para priorizar su gestión en la operación minera.
- III. Proponer medidas de control específicas para cada variable crítica, enfocadas en mitigar el desgaste de los neumáticos y optimizar su vida útil.
- IV. Evaluar la viabilidad técnica y económica de una propuesta de control planteada en tres escenarios distintos (optimista, normal y pesimista), determinando su efectividad para reducir costos, mejorar la eficiencia operativa.





## 6. Metodología

- Para identificar las variables que influyen en el desgaste de los neumáticos en equipos mineros, se hará un levantamiento de estudios internacionales y nacionales, identificando las causas asociadas a los daños o al término anticipado de su vida útil, adicionales a las variables mencionadas, categorizando el impacto ambiental, operacional y el impacto en la seguridad.
- Posteriormente se analizará de las variables anteriores, aquellas que se consideran críticas (80-20 Pareto), y luego se clasificarán aquellas variables críticas que afectan el desgaste de los neumáticos y generan un riesgo significativo; por ejemplo un impacto económico, operacional y ambiental. (ver artículos que ayuden a explicar las posturas ejemplo; 50% op, 30% eco, 20% amb)
- Luego para la propuesta de medidas de control en base a las variables con mayor impacto, se harán tablas de controles, es decir, las medidas de control serán procedimientos asociados al cuidado de neumáticos.
- A continuación, en base a las actividades de control propuestas se asignarán responsables (quién, cómo, cuándo, dónde se evidencia), con el propósito de establecer un protocolo de trabajo (persona, recursos, tiempo) alineados a los objetivos de una organización (pequeña, mediana o gran minería)
- Finalmente se evaluará la pre-factibilidad técnica y económica del sistema de control propuesto, presupuestando el OPEX (mano de obra, insumo, consumos) y CAPEX (maquinaria, infraestructura, inversiones, etc), considerando estimación de ahorros como ingresos hipotéticos, con los cuales se realizará una evaluación de proyecto privado con el método de VAN y TIR. Se utilizará como tasa de descuento para la evaluación de proyecto el método CAPM y WACC.



## 7. Identificación de las variables que influyen en el desgaste de los neumáticos en equipos mineros, considerando factores operacionales, ambientales y diseño que afectan su durabilidad.

Néstor Oswaldo (2020, p.5) en su tesis titulada “**Condiciones de operación del camión Caterpillar 793D, para determinar el desgaste de neumáticos**”, menciona que; los factores que influyen en el desgaste de los neumáticos son: la mala alineación, el frenado prolongado, las velocidades excesivas, presión de aire incorrecta, sometimiento a altas temperaturas, calzada irregular, sobrecarga, daño por impacto, fuego, líquidos corrosivos y otras condiciones mecánicas y de conducción.

La baja presión de inflado conlleva a un incremento en la flexión en los flancos lo cual provoca un aumento en la temperatura interna del neumático; la sobre presión de inflado genera un desgaste abrasivo en la banda de rodadura, lo que los hace ser más propensos a los cortes; la sobrecarga puede producir un desgaste acelerado de la banda de rodadura, incremento en la flexión del neumático, generando a su vez un incremento rápido en la temperatura del neumático; las excesivas velocidades provocan un aumento en las temperaturas y desgaste prematuro del neumático, además la fuerza mecánica que se generan en curvas con muy bajo radio, suelos con mal mantenimiento y martilleo por mal estado de la vía.

Kevin Javier (2022, p. 62) en su tesis titulada “**PROPUESTA METODOLÓGICA PARA ADAPTAR EL MANEJO DE RESIDUOS DE NEUMÁTICOS MINEROS A LA LEY REP**” menciona que; las principales causas del deterioro acelerado de los neumáticos mineros son: el inflado insuficiente, el sobre inflado, sobrecarga y velocidad excesiva, esto provoca que la banda de rodamiento se desgaste más rápido, que la temperatura interna del neumático aumente, que la sensibilidad a cortes o choques aumente, provocan un aumento en la inflexión del neumático. Todo lo mencionado anteriormente, conlleva a una de las causas más frecuentes del desecho de neumáticos, como lo es la separación y cortes de esto.



## 7.1. Cortes y separaciones de las banda de rodadura

Según Kevin, los cortes y separaciones provocan que los neumáticos sean desechados antes de llegar a su vida útil, el 80% de los daños son producidos en la banda de rodadura y el porcentaje restante (20%) se producen en los flancos y hombros de los neumáticos.

Menciona también que existen tres tipos de separaciones:

- a) Separación por cortes: Se generan ocasionalmente por rocas que generan un corte en la banda de rodadura permitiendo el ingreso de agua y/o polvo, lo que oxida los cables de acero en el interior de los neumáticos.

Imagen 8. Neumático con corte en la banda de rodadura.



Fuente: Kevin, J. (2022)

- b) Separación por calor: Esto es generado por los excesos de velocidad del equipo, si bien los neumáticos OTR (Off the Road) están diseñados para soportar cargas altas, más no para altas velocidades. El exceso de velocidad tiene una alta influencia en la temperatura interna del neumático. Al momento del retorno de los camiones descargados, estos no deberían exceder los límites de velocidad para así no perjudicar la capacidad que tienen los neumáticos de disipación de calor.



Imagen 9. Neumático con separación por calor.



Fuente: Kevin, J. (2022)

- c) Separación por esfuerzo (separación mecánica): Se ocasiona cuando existen sobrecargas, cargas que están descentradas y/o malas maniobras (curvas cerradas o ingresos a altas velocidades a botaderos). Esto causa que los neumáticos no sean capaces de soportar los esfuerzos que son aplicados sobre ellos y se rompan los cables que tienen dentro, creando así protuberancias que son fáciles de detectar a simple vista. Debido a esto, se desechan muchos neumáticos sin alcanzar su vida útil. (Kevin, 2022)

Imagen 10. Neumático con separación mecánica.



Fuente: Kevin, J. (2022)

## 7.2. Presión de inflado

La otra causa del desgaste es la alta o baja presión de inflado, el tener una presión adecuada y una buena conservación durante el rodaje, es esencial para optimizar la utilización de los neumáticos y su vida útil. En relación a la presión de inflado de un neumático, se deben evitar 2 situaciones relevantes:(Kevin, 2022).

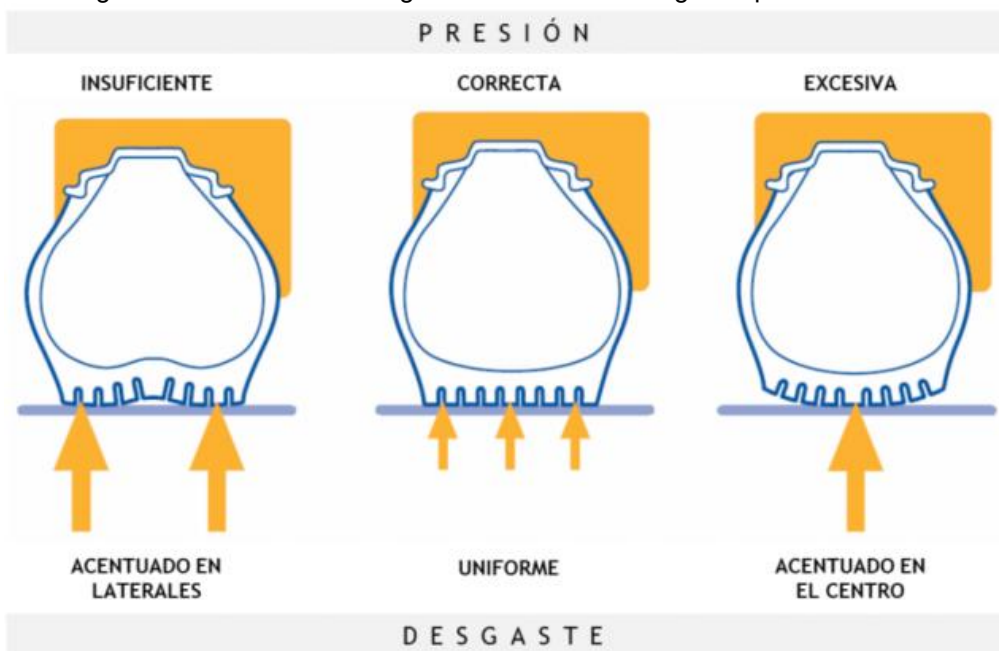
- a) Presión insuficiente: Esto conlleva a la producción valores de compresión elevados en la estructura del neumático, también aumenta el roce de los elementos internos de este y genera un sobrecalentamiento del neumático. Lo mencionado anteriormente provoca un desgaste mucho más rápido e irregular, debido a que la distribución de la presión específica en el suelo cambia, como se puede apreciar en la imagen 11.

Cabe mencionar que, la presión insuficiente también transforma la capacidad que tiene un neumático para oponerse a las fuerzas externas que trastocan la trayectoria definida, lo que provoca que sea difícil poder controlar el vehículo.

- b) Presión excesiva: Genera un desgaste rápido e irregular, con mecanismos similares a los de la presión insuficiente; sin embargo, en este caso, no provoca sobrecalentamiento.

Una presión excesiva, sumando que provoca una menos comodidad al conducir, esto puede afectar al control del vehículo, esto ocurre debido a que altera la capacidad que poseen los neumáticos para absorber las irregularidades del camino y reduce la superficie de contacto con el suelo que tiene la banda de rodadura, la figura 4 muestra un claro ejemplo.

Imagen 11. Diferencia en desgaste del neumático según la presión de inflado.



Fuente: Kevin, J. (2022)

### 7.3. Temperatura interna del neumático

Kevin menciona que, cuando los neumáticos están rodando, se calientan debido a el trabajo que se esta realizando y por el calentamiento de los tambores de freno o bien de los reductores de revoluciones (componentes a cargo del funcionamiento de las ruedas del camión). [29]

La temperatura interna crítica del aire en un neumático, se considera limite a partir del cual exista un peligro para su operación, incluso en ausencias de fuentes térmicas exteriores.

La temperatura es crítica cuando el aire del interior de los neumáticos llega a los 80°C sin embargo, es importante destacar que esta temperatura es inferior a la temperatura real dentro de los componentes del neumático, como la banda de rodadura y las capas internas, donde el calor generado por la fricción y la deformación puede ser significativamente mayor.

Cuando el aire interno alcanza los 80 °C, es una señal de alerta, ya que puede ser un indicador de condiciones desfavorables (sobrecarga, velocidad excesiva o presión inadecuada). En estas instancias, se debe chequear si el aumento de temperatura sigue ocurriendo de tal forma que pueda comprometer la integridad estructural del neumático, afectando su vida útil o aumentando el riesgo de fallos catastróficos.

### 7.4. Sobrecarga

Es posible que los neumáticos experimenten una sobrecarga, la cual puede deberse tanto a la naturaleza y estado del material transportado (densidad, humedad o composición) como a la manera en que se realiza la carga, ya sea por una distribución desigual o excesiva en la tolva del vehículo (Kevin, 2022). [29]

Es fundamental respetar tanto la carga máxima del equipo como su correcta distribución en la tolva. Una distribución inadecuada puede generar una sobrecarga en los neumáticos de un lado, lo que impacta negativamente en su rendimiento (Alvarado, 2019).

Imagen 12. Distribución de carga en la tolva del camión



Fuente: Alvarado, Y. (2019)

## 7.5. Conducción de la maquinaria

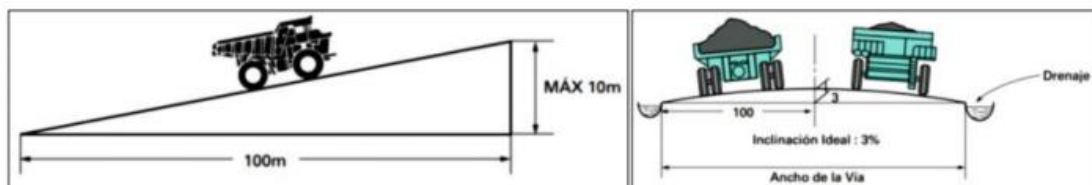
Kevin (2022) [29] menciona que, la manera de conducir la maquinaria afecta directamente la vida útil de los neumáticos OTR, la frecuencia con la que ocurra, por ejemplo: constantes frenados bruscos, aceleraciones bruscas, tomar curvas a grandes velocidades y/o patinazos con las ruedas motrices.

## 7.6. Trazado y mantenimiento de las pistas

Los perfiles longitudinales transversales de las pistas, su forma, el trazado de las curvas presentes en estas, la inclinación de las pendientes, todo lo mencionado anteriormente tiene una importancia significativa en la sobrecarga constante en los neumático, facilita que la banda de rodamiento se separe de la carcasa. [29]

Una pista inclinada, línea recta o en curva que cuente con una pendiente transversal (peralte), aumentara significativamente la carga impuesta sobre los neumáticos situados en el lado contrario a la pendiente (Blanco, 2016). Cabe destacar que las pendientes de las pistas no deben de exceder el 10% y la inclinación no debe superar el 3%, se indicara graficamente a continuación:

Imagen 13. Restricciones de diseños de las pistas.



Fuente: Blanco, J.R. (2016)

El mantenimiento constante o regular de las pistas, su limpieza y retiro de cualquier objeto que obstaculice las áreas de carga y descarga, mantienen a los neumáticos ajeno a accidentes como choques, cortes o perforaciones. Cabe destacar que es importante mantener el regado de caminos, nivelaciones y relleno de agujeros que se formen con el tiempo, también la compactación de superficies blandas y no menos importante, mantener una limpieza de las zonas lodosas.

Cualquier cambio en el estado de los caminos puede provocar que un neumático que daba resultados esperados termine siendo inservible debido a sus características.



---

## 7.7. Duración y longitud de los ciclos

Los ciclos largos, sobre todo en pistas que están acondicionadas, ayudan a alcanzar velocidades excesivas, aumentando la temperatura interna de los neumáticos. Esto también puede ocurrir cuando el tiempo de reposo del vehículo es mucho menor en comparación al tiempo de actividad (tiempo de rodaje). [28]

## 7.8. Velocidades excesivas

El uso de velocidades excesivas de manera continua se identifica como una de las principales causas del desgaste acelerado en los neumáticos OTR. Este comportamiento incrementa la carga de trabajo sobre los neumáticos, afectando directamente la temperatura interna de los mismos. Como resultado, el aumento de calor genera separaciones internas en la estructura del neumático, disminuyendo su integridad y funcionalidad. [29]

Según Alvarado, el exceso de velocidad provoca frenazos repentinos, maniobras bruscas como giros cerrados, y colisiones con obstáculos u objetos presentes en el camino. Estas acciones derivan en un desgaste irregular de los neumáticos, causando daños significativos que reducen su vida útil. Por lo tanto, estas prácticas no solo afectan el rendimiento del equipo, sino que también incrementan los costos operativos debido al reemplazo frecuente de los neumáticos. [26]

## 7.9. Condiciones climáticas

Kevin (2022) señala que las condiciones de temperatura y humedad presentes en los distintos sectores afectan significativamente la capacidad de los neumáticos para soportar las exigencias operativas. En particular, los ambientes secos, caracterizados por temperaturas elevadas, contribuyen al aumento de la temperatura interna de los neumáticos. Este efecto se ve agravado por la falta de mecanismos externos que regulen la temperatura de la superficie de contacto, lo que pone en riesgo la funcionalidad y durabilidad de los neumáticos. [29]





## 7.10. Mantenimiento mecánico

El que los camiones tengan un mal estado mecánico, puede afectar la vida útil de los neumáticos, Morales (2020) aconseja que se debe evitar situaciones como: el tener frenos defectuosos lo que genera que las ruedas metálicas y en efecto los neumáticos, tenga un calentamiento excesivo, exista un paralelismo incorrecto en las ruedas directrices de los camiones y holguras en componentes tales como manguera, rótulas y pivotes.

Considerando los casos mencionados, los neumáticos que estén en el mismo eje, dejaran de estar en paralelo, lo que conlleva a que no roden de manera adecuada sobre el suelo, en cambio, tienden a resbalar provocando un desgaste excesivamente acelerado e desigual. [29]

## 7.11. Posición de los neumáticos

Los neumáticos que están posicionados en las ruedas motrices tendrán una duración por desgaste inferior en un 25%, comparándolos con los neumáticos posicionados en las ruedas directrices. [28]

Blanco [27] (2016) recomienda en su artículo utilizar estrategias de rotación de neumáticos que contemple el desgaste asociado a la ubicación de estos y a su tiempo de uso, lo que facilitara un suministro eficiente en relación a las proyecciones de consumo derivadas de la rotación de neumáticos.

Es indispensable medir la altura de las cocadas de los neumáticos y el registrar las horas de rodado que lleva el neumático para así tener un control actualizado del desgaste que estos tienen al usarlos. A su vez, es esencial gestionar un inventario que disponga de neumáticos nuevos, usados, reparados y disponibles. [27]

## 7.12. Diferencia de diámetros de los neumáticos

Según Kevin, contar con neumáticos de distintos diámetros en conjunto de ruedas gemelas (doble rueda del eje trasero), eje delantero o entre diferentes ejes, conlleva a un desgaste acelerado y desigual de los neumáticos en conjunto. [28]

El gemelado consiste en instalar dos neumáticos con idénticas dimensiones, tamaño y nivel de desgaste para así duplicar su capacidad. Los neumáticos trabajan en conjunto como si fueran solo uno. [29]



### 7.13. Reparación de los neumáticos

A lo largo de la vida útil del neumático, este puede sufrir cortes debido a las condiciones adversas de los caminos o en las áreas de carga y descarga. Es esencial evaluar constantemente estos cortes y así intervenir antes de que afecten la estructura del neumático, provocando por ejemplo un reventón. El realizar reparaciones preventivas permite restaurar el neumático, evitando fallas que podrían acortar la vida útil de un neumático. [29]

Si consideramos un punto de vista económico, realizar reparaciones preventivas es atractivo, ya que de agravarse los daños, se corre el riesgo de perder el neumático en su totalidad, llevando a la empresa a adquirir uno nuevo o con poco uso. Esto tendría un costo más alto que las reparaciones preventivas. [26]

Como bien se menciona anteriormente, estas variables ayudan a que los neumáticos no alcancen su vida útil y se desechen antes de llegar a ella, pero para entender de mejor manera la forma en la que afectan las variables se clasificaron en tres categorías, las cuales son:

#### i. Factores Operacionales:

- Cortes y separación de la banda de rodadura: Se consideran un factor operacional debido a que están directamente relacionados con las condiciones y métodos de operación en el terreno. Los cortes y separaciones son provocados por rocas, escombros o superficies rugosas y las acciones operacionales, si los neumáticos son utilizados en zonas con terrenos difíciles, son más propensos a sufrir daños en la banda de rodadura afectando la vida útil del neumático.
- Presión de inflado: Una presión inadecuada afecta el desgaste uniforme y la seguridad del vehículo.
- Temperatura interna de los neumáticos: Aumenta debido a factores como la sobrecarga, velocidad excesiva, condiciones del terreno y el mantenimiento deficiente de los neumáticos.
- Sobrecarga: Genera tensiones excesivas que reducen la vida útil.
- Conducción de la maquinaria: Al estar directamente relacionada a la operación en la que se emplean por parte de los trabajadores, afectan directamente el rendimiento de los equipos y la durabilidad de los neumáticos.
- Trazado y mantenimiento de pistas: Depende directamente de como son realizados los trazados y su mantenimiento, ya que si se realizan



de manera incorrecta, estas podrían provocar que el neumático se desgaste más rápido.

- Duración y longitud de los ciclos: Esto afecta directamente en la vida útil del neumático, ya que se está haciendo uso en distancias largas y en tiempos prolongados de ciclos, lo que aumenta el desgaste debido a factores como la temperatura que como se mencionó, ayuda a que el neumático se desgasten más rápido a lo que se pronostica.
- Velocidades excesivas: Aumenta la fricción desgastando la banda de rodadura y a su vez genera un aumento en la temperatura del neumático.
- Mantenimiento mecánico: Al realizar malos mantenimientos, de por ejemplo frenos, esto puede provocar que se desgaste aun más rápido ya que, esto puede provocar un sobrecalentamiento del freno y a su vez del neumático, lo que lo convierte en un factor operacional que afecta a la vida útil del neumático.
- Reparación de neumáticos: Esta variable es considerada un factor operacional porque está directamente vinculada a las operaciones de mantenimiento de neumáticos, y si se realiza de mala manera, puede provocar por ejemplo un reventón de neumático, lo que afecta a la operación minera y a la vida útil del neumático.

ii. Factores Ambientales:

- Trazado y mantenimiento de pistas: Se puede considerar un factor ambiental ya que el realizar los trazados y mantenimientos va a depender de las condiciones del terreno, y si las condiciones del terreno son malas, esto puede afectar a la vida útil del neumático, por ejemplo si se forman posos de agua o el camino está con lodo, incrementan la resistencia a la rodadura debido a que la fricción entre neumáticos y el terreno aumenta, también genera daños en la banda de rodadura, pérdida de control, etc.
- Condiciones Climáticas: Se puede considerar un factor ambiental ya que si hay condiciones climáticas altas, esto aumenta la temperatura del neumático lo que provoca que la banda de rodadura se desgaste más rápido, a altas temperaturas los neumáticos pierden propiedades elásticas, lo que puede aumentar la probabilidad de fallos.



iii. Factores de Diseño:

- Trazado y mantenimiento de pistas: Se puede considerar un factor de diseño ya que si vamos a las fases iniciales de una operación minera, la forma en el diseño de trazado de caminos y sus respectivos mantenimientos, impactaran en la vida útil de un neumático, ya sea la geometría de las pistas, pendientes, curvas, pendientes transversales, uso de rellenos, etc. El diseño de las pistas son decisivas en la vida útil de los neumáticos.
- Posición de los neumáticos: Es considerada un factor de diseño porque está relacionada con las decisiones de fabricación de los equipos y la forma en que los neumáticos están dispuestos en el vehículo. Si consideramos la ubicación de los neumáticos, los que están posicionados en las ruedas motrices experimentan un rápido desgaste debido a la tracción constante y el esfuerzo adicional que emplean al moverse en terrenos abrasivos.
- Diferencia de diámetros de los neumáticos: Es considerada un factor de diseño ya que esta directamente relacionada con el diseño de vehículos y de los neumáticos, la diferencia de diámetros es esencial, especialmente cuando se usan neumáticos gemelos, puede generar un desgaste irregular, también para la distribución de peso, ya que los diámetros de los neumáticos deben ayudar a distribuir la el peso y la fuerza de tracción de manera optima.

Ámbito operacional:

Eric Matson, gerente global de servicios de campo de Goodyear, destaca que la revisión diaria del inflado y desgaste de los neumáticos debe ser el eje central de cualquier programa de mantenimiento. Según Matson, “mantener los niveles correctos de inflado es una de las estrategias más efectivas que una operación minera puede implementar para maximizar el rendimiento de los neumáticos y prolongar su vida útil”. Además, señala que integrar un sistema automatizado de monitoreo de presión no solo ayuda a mantener los niveles adecuados, sino que también mejora la eficiencia energética, reduce costos de combustible y disminuye las emisiones de carbono, beneficiando tanto a la operación como al medio ambiente.

Matt Johnson, de MAXAM Tire, enfatiza la relevancia de las inspecciones regulares en entornos mineros: "Realizar una inspección previa al cambio de turno es un procedimiento sencillo, pero tiene un impacto significativo en la mejora del tiempo de actividad y la seguridad". Asimismo, resalta la importancia de un monitoreo preciso de la presión de los neumáticos: "La variación entre las presiones en frío y en caliente debe definirse para cada temporada, ciclo y posición de las ruedas de manera individual. Esto se logra



ajustando las presiones en frío después del mantenimiento en el taller y verificándolas nuevamente tras al menos cuatro horas de operación continua".

Klant, representante de Continental, subraya los beneficios de mantener una presión óptima en los neumáticos: "Un operador puede ahorrar hasta 15 minutos por vehículo en inspecciones, lo que equivale a 195 horas al año, mejorar la eficiencia del combustible en un 1% y extender la vida útil de la banda de rodadura en promedio un 15%, comparado con un neumático con un 10% de desinflado". Además, advierte que "una presión de neumáticos incorrecta significa un consumo de combustible significativamente mayor y, por consiguiente, mayores emisiones de carbono, además de un importante desperdicio de recursos y dinero".

Johnson enfatiza que las inspecciones deben incluir una revisión detallada en busca de cortes profundos en el acero, burbujas en la pared lateral y daños graves en la banda de rodadura, ya que estos problemas podrían ser indicativos de sobrecarga o la presencia de residuos en los caminos de transporte que están afectando los neumáticos. Además, señala: "Es fundamental inspeccionar las ruedas para detectar daños en los neumáticos o en las llantas, ya que las llantas dobladas o agrietadas pueden provocar pérdida de presión, lo que resulta en inflado insuficiente y sobrecarga. En casos extremos, esto podría ocasionar daños estructurales o incluso la explosión de los neumáticos".

Allan, de Kal Tire, destacó que, además de las inspecciones visuales realizadas por operadores humanos, ahora se cuenta con estaciones de inspección autónomas impulsadas por inteligencia artificial. Estas estaciones emplean cámaras termográficas para evaluar el estado de los neumáticos con precisión, ofreciendo una solución tecnológica avanzada para el mantenimiento preventivo y la detección temprana de problemas. Allan, explicó que, una vez realizadas las inspecciones, es fundamental generar órdenes de trabajo prioritarias mediante un programa de operaciones de neumáticos, para informar a los técnicos sobre los problemas y su gravedad. "Trabajar con inteligencia artificial ha hecho que esto sea aún más abarcativo", agregó, "ya que ahora esto se puede hacer mientras los camiones están en movimiento, con órdenes de trabajo creadas automáticamente, permitiendo que los técnicos se preparen para el cambio o trabajo necesario".

Siebert, de Bridgestone, señaló que la digitalización juega un papel clave en la industria minera: "Seguimos viendo cómo el cliente de hoy valora los datos y la información más que nunca". Además, destacó que los clientes buscan soluciones innovadoras que ofrezcan actualizaciones en tiempo real sobre todos los aspectos de su operación, con equipos seguros y confiables para el sitio. "También quieren esto en la palma de su mano", agregó. Siebert concluyó: "Todo esto se relaciona con la sustentabilidad: aprovechar al máximo sus operaciones".



Adam Murphy, de Michelin, afirmó que los sistemas de gestión de neumáticos conectados “brindan a las minas información crucial para operar de manera más segura, inteligente y sostenible”. En sus primeros días, estos sistemas se limitaban a ofrecer datos sobre la presión y temperatura de los neumáticos, ayudando a prevenir el desgaste prematuro y las fallas. Hoy en día, sin embargo, han evolucionado y se han vuelto “mucho más avanzados, incorporando tecnologías como GPS y geofencing para monitorear la posición, la velocidad y las rutas, factores que pueden contribuir al desgaste prematuro de los neumáticos”. Murphy destacó que, al aprovechar los datos entre vehículos y neumáticos, el personal minero obtiene información valiosa que refuerza la seguridad, mejora la productividad general de la mina, reduce costos y aumenta la disponibilidad de los camiones.

Reinhard Klant, de Continental, destacó que esto abre la puerta a los neumáticos inteligentes, los cuales pueden ser rastreados en todo momento, lo que ofrece un mayor control sobre su vida útil operativa. La funcionalidad integrada para monitorear los controles y el estado de salud de los neumáticos “también permite hacer predicciones más claras sobre cuándo será necesario reemplazarlos o rotarlos”, añadió Klant.

Klant explicó que los sistemas de gestión de neumáticos más avanzados pueden incorporar un gemelo digital para cada neumático, incluyendo el número de pieza. Esto permite a los operadores de flotas “saber en todo momento qué neumático está instalado en cada vehículo y en qué posición”. Además de monitorear la presión de inflado y la temperatura, estos sistemas también permiten rastrear otros parámetros de rendimiento relacionados con los controles de la flota, como la profundidad de la banda de rodadura y el estado general de los neumáticos.

Matson, de Goodyear, explicó que los datos recopilados “establecen estándares y puntos de referencia que permiten a las minas tomar decisiones más informadas sobre los neumáticos que están utilizando, además de facilitar una predicción más precisa de las necesidades futuras de neumáticos”. Añadió que “al monitorear el rendimiento y otros indicadores a lo largo del tiempo, se mejora la capacidad de prever cuándo será necesario reemplazar los neumáticos, lo que incrementa la eficiencia y reduce el desperdicio”.

Ámbito ambiental:

La industria minera está avanzando significativamente en la reducción del desperdicio prematuro de neumáticos. Las compañías están adoptando estrategias más efectivas para optimizar el ciclo de vida de los neumáticos, mientras que la cadena de suministro promueve un uso más responsable, respaldado por tecnologías de mantenimiento de última generación. Además, las innovaciones en los materiales y procesos de fabricación enfocados en la



sostenibilidad reflejan el claro compromiso del sector por impulsar un cambio positivo. [36]

Vivanco y Mamami subrayan que el camino hacia una mayor sostenibilidad comienza con el manejo diario de los neumáticos. “El desgaste de los neumáticos está influido por múltiples factores, como la habilidad del operador, las condiciones climáticas, el mantenimiento del equipo y el estado de las vías”, explican. Citan un caso de estudio en una mina del norte de Chile, donde entre 2019 y 2021 se descartaron 48 neumáticos de cargadoras frontales y 223 de camiones mineros, con un valor aproximado de 5,1 millones de dólares. “De este total, entre el 80% y el 90% fueron descartados prematuramente debido a daños operacionales, sin alcanzar su vida útil completa”, concluyen. [36]

Christian Erdelyi, gerente de soluciones de tecnología minera en Kal Tire Mining Tire Group, destaca que apoyar el uso de neumáticos de minería hasta alcanzar el 100% de su desgaste es un área clave donde la cadena de suministro puede marcar la diferencia. “Cuanto más frecuentes y de mayor calidad sean las inspecciones de los neumáticos, mejor podremos detectar problemas tempranos, prolongando su vida útil y tiempo de operación”, señala. [36]

Kal Tire, una empresa de origen canadiense, ha desarrollado TireSight, un paquete autónomo de inspección y planificación de mantenimiento de flotas. Este sistema responde tanto a las demandas de las minas cada vez más automatizadas como a los desafíos de los mineros en su búsqueda de mayor seguridad, productividad y optimización del rendimiento de los neumáticos. [36]

Michelin considera que los caminos de acarreo son fundamentales para cualquier mina, ya que influyen directamente en la seguridad y productividad de las operaciones. “Mantenerlos en condiciones óptimas sigue siendo, en muchos casos, un proceso manual y reactivo”, comenta la compañía, señalando que la tecnología puede desempeñar un papel clave en este aspecto. [36]

El sistema Michelin Better Haul Road monitorea de forma continua las condiciones de las rutas de transporte, proporcionando análisis basados en datos para “ayudar a las minas a mantener la seguridad y el cumplimiento normativo, aumentar la eficiencia operativa y priorizar recursos y acciones”. Esta solución, que combina software móvil y herramientas basadas en la web, permite a los equipos de minería identificar digitalmente problemas potenciales en los caminos, evaluar su nivel de urgencia y compartir hallazgos para coordinar las acciones correctivas. [36]

“Este enfoque proactivo garantiza que los problemas se resuelvan rápidamente, reduciendo el tiempo de inactividad y asegurando un flujo



continuo en las operaciones. Además, abre oportunidades para disminuir el consumo de combustible y energía”, destaca Christel Dubus, CMO de Michelin Mining Services. Según Dubus, monitorear estas rutas no solo mejora su fiabilidad y durabilidad, sino que también optimiza el rendimiento general de las operaciones mineras. [36]

Por su parte, Vivanco y Mamami refuerzan la importancia de una gestión eficiente de las vías de transporte, subrayando que “mantener las rutas limpias y en buen estado reduce el desgaste de la banda de rodadura de los neumáticos y ayuda a prevenir desequilibrios en las cargas”. [36]

Mantener la presión adecuada de los neumáticos es esencial para maximizar su vida útil, lo que ofrece una valiosa oportunidad para mejorar tanto la eficiencia económica como el compromiso con el medio ambiente. [36]

Un estudio independiente indica que entre el 50% y el 75% de los neumáticos se desechan antes de tiempo debido a problemas relacionados con una presión de inflado excesiva. Además, una investigación reciente publicada en Ingeniería y Ciencias Aplicadas por la Universidad de Minas y Tecnología de Ghana [37] analiza los riesgos que enfrentan los neumáticos OTR en entornos mineros.

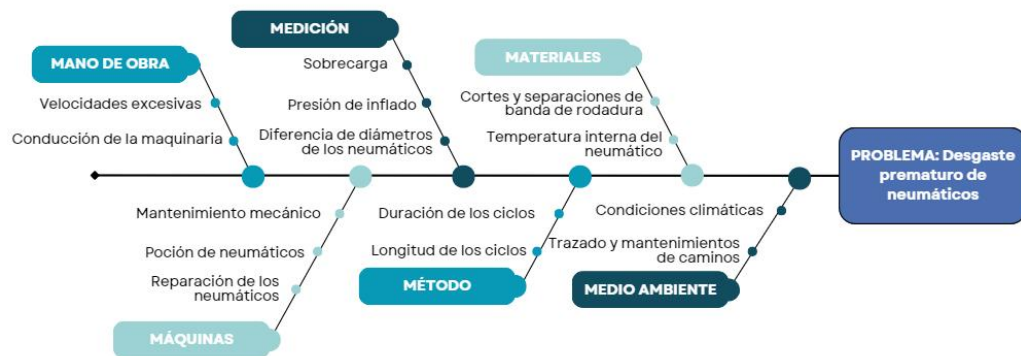
Según los autores, “las causas principales de fallas significativas en los neumáticos son variadas, incluyendo condiciones del suelo deficientes, la presencia de agua, errores del operador y un inflado inadecuado”. También señalan que otros factores críticos son “la generación excesiva de calor y el estrés mecánico, como el trompo, el derrape o el deslizamiento”, todos los cuales contribuyen al desgaste prematuro y fallas operativas. [37]



## 8. Análisis y clasificación de las variables críticas que afectan al desgaste de los neumáticos en la minería, identificando riesgos significativos con impacto económico, operativo y ambiental, para priorizar su gestión en la operación minera.

- Luego de identificar las variables que influyen en el desgaste de neumáticos, se hizo un diagrama de Ishikawa (imagen 14) para identificar de mejor forma las causas del desgaste prematuro de los neumáticos de maquinaria pesada en minería, también se identificaron los posibles riesgos críticos (Tabla 2) que poseen las variables identificadas en el diagrama.

Imagen 14. Diagrama de Ishikawa



Fuente: Creación propia

El diagrama de Ishikawa aborda el problema del desgaste prematuro de neumáticos, identificando las principales categorías que contribuyen al problema. El diagrama se distribuyó en 6 categorías (6M), lo que permite un análisis detallado de las causas raíz.

En la categoría de mano de obra, se destacan problemas como las velocidades excesivas y conducción inadecuada de la maquinaria, lo que dependen de la práctica operativa de los operadores. Por otro lado, en la categoría máquinas, el mantenimiento mecánico deficiente juega un rol crucial ya que, la falta de un mantenimiento preventivo puede agravar el estado del neumático, también se incluye aspectos como la posición incorrecta de los neumáticos y reparaciones ineficientes o inadecuadas. La categoría medición señala problemas como la sobrecarga, la presión de inflado y la diferencia de diámetros de los neumáticos, en cuanto a la categoría método, se destaca la duración y longitud de los ciclos prolongados. La categoría materiales destaca los cortes en la banda de rodadura y la temperatura interna de los neumáticos como variables que contribuyen al desgaste y por último la categoría medio ambiente, nos destaca las condiciones climáticas adversas, el mal trazado y mantenimiento de caminos



que intensifican el desgaste prematuro de neumáticos. El abordar estas variables identificando los riesgos críticos que poseen, nos ayudara a abarcar de mejor forma el problema.

Tabla 2. Riesgos críticos de las variables

Variables		Riesgos Críticos		
		Operacionales	Económicos	Ambientales
1	Cortes y separaciones de las bandas de rodadura	Accidentes, reventones, paralización de la operación minera, mayor esfuerzo de motor	Aumento en los costos operacionales, adquisición de repuestos y paralización de la operación	Aumento de residuos químicos, emanación de gas
2	Alta/Baja presión de inflado	Desgaste desigual, pérdida de tracción, reventón por sobre inflado, consumo de combustible	Paralización de la operación, pérdida de rentabilidad, aumento en los costo de operación, aumento de costo de mantenimiento	Aumento de residuos, emanación de gases, desechos de neumáticos irreparables
3	Alta temperatura interna del neumático	Probabilidad de incendio en el neumático, pérdida de rendimiento, cambio temprano de neumático por desgaste temprano	Aumento en los costos operacionales, paradas no planificadas por incendio o desgaste prematuro el neumático	Generación de residuos, contaminación térmica, contaminación por humo negro
4	Sobrecarga	Pérdida de control, accidentes, caída de material rocoso, vuelcos, sobre esfuerzo del neumático, reventón	Paralización de la operación por accidentes, pérdida de rentabilidad, aumento de los costos operacionales	Generación de desechos de neumáticos, contaminación por la caída de material rocoso a pistas o alrededores
5	Conducción de la maquinaria errónea	Aumento en la probabilidad de accidentes, pérdida de control, reducción de la estabilidad, disminución en la flota operativa	Paralización de la obra, aumento en los costos operacionales por inactividad	Contaminación por gases de efecto invernadero, contaminación de desechos por el desgaste prematuro de neumáticos
6	Mal trazado y mantenimiento de pistas	Accidentes, derrumbes, aumento en el tiempo de los ciclos de trabajo, desgaste desigual de los neumáticos	Aumento en los costos de reemplazo de neumáticos, costos de mantenimiento de camiones, aumento en los costos operativos	Generación de partículas contaminantes, alteración innecesaria de los paisaje, emisiones de carbobno por el sobre esfuerzo del motor
7	Extensa duración y longitud de los ciclos de trabajo	Sobrecalentamiento de neumáticos, fatiga operacional, aumento en el desgaste de los neumáticos por la exposición al calor o a sobrecargas	Aumento en los costos de mantenimiento por constantes reemplazos, pérdida en la productividad, aumento en los costos de operación	Aumento en las emisiones de gases por el alto consumo de combustible en los ciclos largos, alteración en los ecosistemas debido a la extensión de los trazados de caminos
8	Velocidades excesivas	Accidentes, pérdida de control, desgaste excesivo de los neumáticos, aumento en el consumo de combustible	Aumento en los costos operacionales, pérdida de maquinarias por accidentes	Emanación de gas, derrame de combustible
9	Condiciones climáticas adversas	Accidentes por la pérdida de tracción y estabilidad, sobrecalentamiento, interrupción de la operación por accidentes	Aumento en los costos de mantenimiento, aumento en los costos de mantenimiento de caminos	Erosión y contaminación del terreno, desprendimiento de rocas, aumento en la huella de carbono
10	Mal mantenimiento mecánico	Accidentes por mantenencias defectosa, paradas no programadas por fallos mecanicos	Costos adicionales por malas mantenencias y en mantenencias correctivas, aumento en los costos operacionales, disminución de la eficiencia operativa, consume de combustible	Contaminación por derrame, contaminación por residuos de neumático
11	Posición de los neumáticos incorrecta	Desgaste desigual de los neumáticos, pérdida de tracción y estabilidad provocando accidentes, mayor exigencia en los sistemas direccionales y de suspensión	Aumento en los costos de reemplazo, aumentos en los costos operacionales, reducción de la productividad por desgaste prematuro	Mayor contaminación por el consumo de combustible debido a la resistencia de rodado, desechos de neumáticos, contaminación por partículas de desgaste
12	Diferencia de diámetros de los neumáticos	Accidentes provocados por el desbalance de la distribución de carga, fallas en la transmisión y sistema de tracción, aumento del esfuerzo mecánico	Aumento en los costos de reparaciones mecánicas, aumento en los costos operacionales, reducción de la eficiencia operativa debido a fallas relacionadas con la diferencia de diámetros	Aumento en las emisiones de gases, generación de residuos adicionales de caucho, mayor contaminación de partículas
13	Reparación de los neumáticos insuficiente o malas	Pérdida de la integridad estructural, tiempo de inactividad operativa no planificada, reventones, aumento en la temperatura del neumático	Aumento en los costos de reparación debido a nuevas intervenciones por un reparado inadecuado, aumento en reparación de otros componentes, pérdida en la productividad	Mayor volumen de residuos de caucho por reparos ineficientes, emisiones de gases contaminantes, contaminación por la utilización de productos para reparaciones de neumáticos

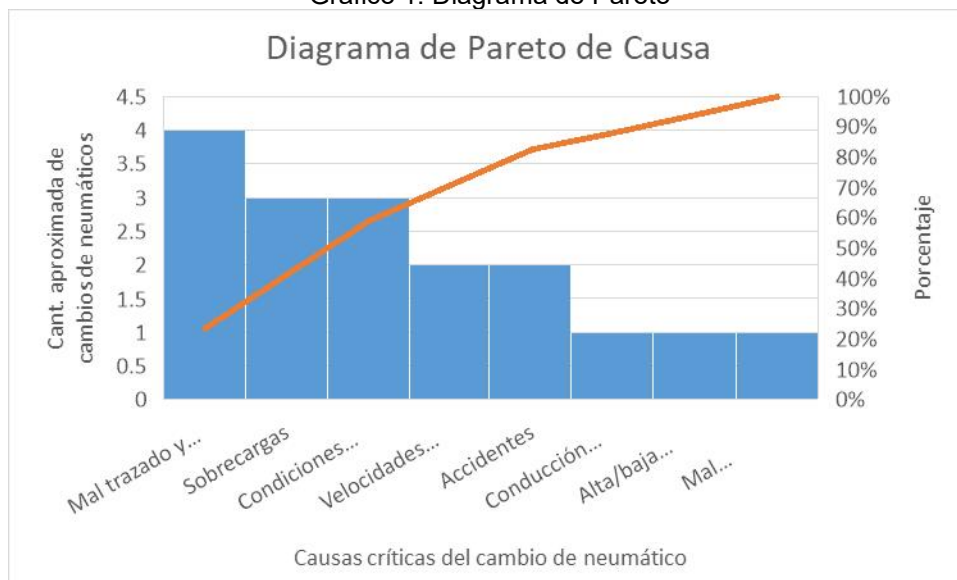
Fuente: Creación propia

Se nos muestra 13 variables que influyen en el desgaste prematuro de neumáticos, entre ellas están la sobrecarga, altas temperaturas internas de los neumáticos, condiciones climáticas adversa, etc. También se aprecia que cada variable tiene sus respectivos riesgos críticos operacionales, económicos y ambientales. Esto sirve para identificar los riesgos críticos que conllevan las variables y compararlos con la realidad.



Las tablas 3 y 4 presentes en el anexo, nos muestran las causas más críticas que influyen en el desgaste prematuro de neumáticos y la cantidad de veces que se tuvo que cambiar un neumático al mes por esa causa, también como dato adicional, se menciona los posibles costos que se tuvo que cubrir, lo que nos ayuda a saber en cuanto aumentaron los costos. Como ultimo detalle se puede apreciar que con los datos se lograría realizar un diagrama de Pareto y concluir a simple vistas que las 4 causas más relevantes (bajo el 80%) son el mal trazado y mantenimiento de pistas, las sobrecargas, condiciones climáticas adversas y las velocidades excesivas, cabe señalar que si los accidentes no forman parte del 80%, no hay que despreocuparse porque así como en la sobrecarga, mal trazado y mantenimiento de pistas, puede existir potenciales reventones de neumáticos, en los accidentes también existe una probabilidad dependiendo de la gravedad de este, lo que llevaría a más que solo una perdida económica, sino que una paralización total de una obra minera.

Gráfico 1. Diagrama de Pareto



Fuente: Creación propia

Podemos evidenciar que las causas más recurrentes por desgaste prematuro de neumáticos son el mal trazado de caminos y mantenimiento de pistas, seguida por las sobrecargas, las condiciones climáticas, y por ultimo las velocidades excesivas. El mal trazado y mantenimiento de pistas representa un 23,53%, las sobrecargas y condiciones climáticas adversas representan un 17,65% de las causas del desgaste prematuro de neumáticos y por ultimo, las velocidades excesivas y accidentes representan un 11,76%, todas las variables anteriores forman parte del 83,35% de las causas del desgaste prematuro de neumáticos y bajas.

De acuerdo con los datos mencionados previamente, las causas más comunes de fallas en neumáticos incluyen el mal estado de las pistas, la



sobrecarga, las condiciones climáticas adversas, entre otras. Estas conclusiones se relacionan con una investigación realizada por el Sr. Juan Ignacio Morales Navarro en la Universidad de Chile titulada **“Aumento de vida útil de los neumáticos para la flota de transporte de Minera Centinela”**, En su tesis, Morales identifica que los neumáticos que no alcanzan la vida útil especificada por los fabricantes suelen ser desechados debido a cortes, separaciones por corte, calor, separaciones mecánicas y mala presión de inflado, ya sea excesiva o insuficiente, de las cuales algunas son causadas por el mal estado de los caminos donde según Morales la minera que el menciona utiliza un sistema llamado Rack-Bias-Pitch que los ayuda a supervisar y evaluar el estado de los caminos, también analiza que la sobrecarga también es un factor, y para mitigar esta problemática hizo un análisis de indicadores como Toneladas por Kilómetro por Hora (TKPH) lo que ayudo a determinar si las cargas eran compatibles a las especificaciones de los neumáticos. (Morales, J. 2020) [38]

Aunque Morales no profundiza en el impacto de las condiciones climáticas, sugiere estrategias operacionales que consideran los climas adversos y cómo estos pueden influir en la durabilidad de los neumáticos. También destaca que las velocidades excesivas y las malas prácticas operativas contribuyen significativamente al desgaste desigual y prematuro de los neumáticos.

Como medida de mitigación, Morales elaboró un manual de buenas prácticas operativas, en el cual incluyó recomendaciones específicas de los fabricantes de neumáticos. Este manual tiene como objetivo reducir el desgaste asociado a los malos hábitos de conducción y mejorar la eficiencia en el uso de los neumáticos (Morales, J. 2020).

Finalmente, Morales destaca los resultados y las mejoras implementadas, entre las cuales sobresale la reducción de bajas operacionales. Señala que logró disminuir significativamente la cantidad de neumáticos dados de baja por causas operacionales, que en ese momento representaban la principal fuente de problemas. Asimismo, menciona una mejora en la vida útil de los neumáticos en algunos modelos de camiones estudiados, como el CAT 793 y el CAT 797.

Por ejemplo, en la flota de camiones CAT 793, se logró un aumento del 6,5% en la vida útil de los neumáticos. Según Morales, estas mejoras se tradujeron en un ahorro de 6.242 USD en costos operativos durante el periodo de investigación (Morales, J. 2020).



## **9. Propuestas de diseño de un sistema de control o medidas de control para optimizar el uso de neumáticos en equipos mineros, mitigando el desgaste, considerando el riesgo más crítico y alineándose con la sostenibilidad y eficiencia empresarial.**

Para proponer diseños de sistemas de control o medidas de control se tomara 1 de los 4 riesgos más críticos que contribuyen al desgaste prematuro del neumático, los cuales se identifican en el diagrama de Pareto (Gráfico 1).

### **9.1. Cadenas de protección de neumáticos**

- El impacto que genera el trazar mal los caminos de operación e incluso el mal mantenimiento de los mismo son graves, pueden provocar daños graves y permanentes a los neumáticos, como por ejemplo cortes, reventones, sobre esfuerzos, perdida de la estabilidad, etc. Por lo que considerando estos peligros, procede a proponer la idea de la utilización de cadenas de protección para neumáticos OTR.
- El uso de estas cadenas de protección puede ser una solución eficiente para mitigar el desgaste prematuro de los neumáticos, ya que no solo ofrecen una mayor durabilidad de los neumáticos, sino que también mejoraría el rendimiento de los equipos en condiciones extremas [30], esto también puede abarcar la problemática con las condiciones climáticas adversas.
- En la minería hay entornos donde las piedras afiladas y los escombros son una amenaza constante para los neumáticos y sin la protección adecuada estos pueden perforar o dañar la banda de rodadura, esto acelera el desgaste y aumenta el riesgo de accidente. Las cadenas de protección actúan como un muro que evita el contacto directo con el suelo, reduciendo significativamente los daños y prolongando la vida útil estimada de los neumáticos. Además, las cadenas ayudan a la distribución de la presión de manera uniforme, esto disminuye el desgaste en áreas específicas y evitan la formación de puntos de presión que debilitan la estructura del neumático, lo que puede llegar a provocar reventones. [30]
- Estas cadenas estas diseñadas específicamente para resistir altas temperaturas y ayudan a disipar el calor, protegiendo al neumático de daños térmicos, lo que permite que los neumáticos operen en condiciones de alta temperatura si sufrir deformaciones ni sufrir la perdida de rendimiento. Además, las cadenas evitan cualquier material rocoso caliente o puntiagudo entre en contacto directo con los neumáticos, lo que reduce el riesgo de daños graves. Esta característica también es



fundamental para operaciones que pueden involucrar el manejo constante de materiales a altas temperaturas. [30]

- Las cadenas de protección no solo protegen a los neumáticos, sino también ayuda a mejorar la tracción de los vehículos en terrenos resbaladizos (zonas húmedas con formación de barro o pozas de agua) o abrasivos (rocosos, secos, altas temperaturas). En minería, los vehículos operan en zonas de grava, lodo, arena o rocas, donde la tracción es limitada, por lo que el uso de cadenas ayudan a aumentar la adherencia al suelo, ayudando a la estabilidad y seguridad de los vehículos, incluso si las condiciones son difíciles. La mejora en la tracción no solo reduce el riesgo a accidentes, sino que también minimiza el esfuerzo que debe hacer el neumático para mantener el control, esto ayuda a reducir el desgaste causado por la fricción constante por malas condiciones del terreno. [30]
- El uso de cadenas de protección también ofrecen una serie de beneficios adicionales a la mitigación del desgaste prematuro. Estos beneficios son: mayor durabilidad de los neumáticos, menores costos operativos y aumento en la seguridad en los lugares de trabajo.
- Como mencionamos anteriormente, el primer beneficio que ofrece el uso de cadenas de protección es la prolongación de la vida útil de los neumáticos. Al evitar el contacto directo de los neumáticos con objetos afilados, abrasivos o extremadamente calientes, las cadenas reducen el desgaste de la banda de rodadura y protegen la integridad estructural de este, lo que lleva a que el neumático pueda durar mucho más tiempo antes de necesitar un reemplazo, esto reduce los costos asociados a la adquisición de nuevos neumáticos. Además permite que los neumáticos mantengan su rendimiento óptimo durante más tiempo, aumentando la producción y disminuyendo los tiempos de inactividad debido a reparaciones o reemplazos. [30]
- El desgaste prematuro de neumáticos significan costos operativos adicionales a los planificados. El uso de cadenas de protección puede ayudar a las empresas a reducir estos costos. Un menor desgaste significa menor cantidad de reemplazos por fallas, lo que conduce a disminuir gastos en repuestos y mantenimientos. Al reducir la frecuencia de los tiempos de inactividad por reparaciones o cambios de neumáticos, ayuda a que las operaciones continúen sin interrupciones, esto maximiza la productividad y disminuye las pérdidas económicas. [30]
- La seguridad es un factor importante en una operación minera. El uso de cadenas de protección aumenta la seguridad en las operaciones. Los terrenos peligrosos en la minería a cielo abierto, pueden provocar la pérdida de tracción o fallos en los neumáticos que conllevan a accidentes graves. Las cadenas mejoran la estabilidad y el control del vehículo, lo



que conlleva a la reducción de riesgos de resbalones, vuelcos u otros accidentes graves. [30]

- En zonas como las canteras, los vehículos a menudo deben enfrentarse a los terrenos abrasivos y altamente rocosos, lo que puede dañar a los neumáticos rápidamente si no se utilizan medidas de protección. Las cadenas son esenciales en estos entornos, debido a que protegen de escombros afilados y reducen el desgaste provocado por la abrasión constante. [30]
- Si bien el uso de cadenas es una propuesta interesante, existen factores a considerar al seleccionar cadenas, los cuales pueden afectar tanto a durabilidad de la cadena como el rendimiento.
- El primer factor clave es el tamaño y tipo de neumático, ya que no todas las cadenas son compatibles con todos los neumáticos, el elegir las cadenas adecuadas es crucial para garantizar un ajuste seguro y protección eficaz. Además, algunos tipos de neumáticos tienen características particulares que pueden requerir tipos de cadenas específicas, como las que operan en condiciones de alta carga o terrenos abrasivos. [31]
- Otro factor a tener en cuenta es el tipo de terreno en el que se va a operar, los terrenos varía desde terrenos rocosos y secos hasta húmedos o nevados, cada uno presenta diferentes desafíos. Por ejemplo, los terrenos rocosos demandan cadenas de mayor resistencia para evitar daños causados por rocas afiladas. El seleccionar cadenas diseñadas específicamente para las ciertas condiciones del terreno, mejorara tanto la durabilidad de los neumáticos como al eficiencia del vehículo. [31]
- La vida útil de las cadenas debe ser una consideración importante, algunas cadenas están diseñadas para durar largos periodos de tiempos, pero requieren mayor mantenimiento, mientras que otras están diseñadas para tener una vida útil más corta, pero con un costo de mantenimiento más económico. La frecuencia de reemplazo depende del uso y el nivel de desgaste al que están expuestas. [31]
- El mantenimiento preventivo desempeña un papel fundamental en la prolongación de la vida útil y el rendimiento óptimo de las cadenas de protección. Este proceso incluye inspecciones regulares para identificar signos de desgaste, deformaciones o roturas en los eslabones, y llevar a cabo los ajustes o reemplazos necesarios de manera oportuna. Es esencial eliminar residuos como barro, piedras y otros materiales que puedan acumularse entre los eslabones, ya que estos pueden provocar desgaste prematuro y comprometer la funcionalidad de las cadenas. Además, las cadenas deben almacenarse adecuadamente en un ambiente seco y a temperaturas moderadas para prevenir la corrosión y



preservar su calidad. Al mantenerlas en condiciones ideales y realizar un mantenimiento constante, se maximiza su vida útil y se asegura su desempeño en aplicaciones exigentes, como las operaciones mineras o de construcción. [31]

## 9.2. Pitcrew AI

Pitcrew AI es un sistema de monitoreo de neumáticos OTR que ayuda a proteger a las personas, reduce el tiempo de inactividad de la operación y aumenta las ganancias.

El sistema de inspección automática de neumáticos OTR está diseñado para detectar de manera precisa y en tiempo real lesiones, cortes y separaciones en los neumáticos de vehículos de gran minería. Utiliza una combinación de tecnologías avanzadas, como imágenes térmicas, inteligencia artificial (IA) y aprendizaje automático, lo que permite identificar problemas en sus etapas más tempranas, antes de que se conviertan en fallos graves que podrían comprometer la seguridad y productividad de la operación minera. [39]

Este sistema opera como una solución de Internet Industrial de las Cosas (IIoT), integrándose perfectamente en el flujo de trabajo del sitio sin necesidad de modificaciones adicionales. Se instala a un lado de los caminos de acarreo y funciona de manera continua, las 24 horas del día, los 7 días de la semana, durante todo el año, sin requerir intervención humana. Esta capacidad de operar de forma autónoma reduce el riesgo de error humano y mejora la eficiencia operativa. [39]

Uno de los beneficios clave del sistema es su contribución a la seguridad en las minas. Al eliminar la necesidad de inspecciones manuales en zonas de alto riesgo, reduce las interacciones entre las personas y los vehículos, minimizando la probabilidad de eventos relacionados con neumáticos sobrecalentados y otros incidentes evitables. Esto no solo mejora la seguridad, sino que también aumenta la productividad de la mina al reducir el tiempo de inactividad no planificado debido a daños en los neumáticos. [39]

Además, este sistema tiene un impacto positivo en la gestión de costos. Al identificar daños reparables en una etapa temprana, permite a las minas realizar reparaciones preventivas antes de que los problemas escalen, lo que reduce el costo total de propiedad de la flota de transporte. La extensión de la vida útil de los neumáticos también contribuye a la sostenibilidad de las operaciones, al reducir la necesidad de reemplazar neumáticos costosos de manera prematura. [39]

En el ámbito de la inspección rutinaria, los métodos actuales de la industria para detectar daños en los neumáticos implican inspecciones manuales de rutina, lo que varía según las operaciones, pero a menudo se realizan cada





pocos días. El inspeccionar algún vehículo requiere de tiempo de inactividad, donde el camión es sacado del ciclo de trabajo y se aísla. Cuando hay tiempo de inactividad innecesaria del vehículo, resulta en una pérdida en la producción para la mina. La inspección manual tiene sus limitaciones como el no detectar algunas fallas por ejemplo, si la falla está en contacto con la superficie de la pista cuando se realiza la inspección. Las inspecciones requieren que los técnicos de neumáticos estén en contacto físico con la superficie de la banda de rodadura del neumático. Los neumáticos OTR son recipientes de presión que almacenan grandes cantidades de energía, minimizar las interacciones directas limita la exposición del personal a un riesgo significativo de seguridad. [39]

Acá es donde Pitcrew AI entra, el sistema se ofrece generalmente como una plataforma portátil, autónoma y alimentada por energía solar, diseñada para instalarse junto a las carreteras de transporte en cuestión de horas. Incluye una cámara térmica de alta calidad y un procesador avanzado de visión por computadora con inteligencia artificial. También existen versiones adaptadas para climas fríos, donde la irradiación solar es reducida, o para entornos subterráneos con clasificación de zona peligrosa. El sistema es activado de manera remota por los ingenieros de Pitcrew AI, sin necesidad de modificar las operaciones del sitio. Puede inspeccionar cada vehículo sin necesidad de detenerlo, realizando verificaciones continuas las 24 horas del día, los 7 días de la semana, durante todo el año, sin intervención humana. [39]

El sistema tiene la capacidad de identificar daños menores en los neumáticos, como perforaciones causadas por rocas, orejetas faltantes o cortes por rocas, situaciones comunes en los neumáticos traseros (posición 3 a 6) de los camiones de acarreo cuando retroceden sobre escombros en la escombrera. También permite inspeccionar los neumáticos delanteros, donde es más frecuente la aparición de calor y separaciones en los bordes de la correa. Cada incidente de daño es registrado con un ID único, lo que facilita su seguimiento. Tras la detección inicial, el neumático puede ser revisado y, si es reparable, retirado y reparado, lo que contribuye a reducir los costos en la compra de neumáticos nuevos. Además, la reparación de neumáticos resulta más ecológica que la sustitución, lo que puede ser un factor importante para ayudar a las minas a cumplir con sus objetivos de sostenibilidad, a menudo obteniendo beneficios a través de programas de créditos de carbono. [39]

Si el neumático presenta daños irreparables y se considera que no merece reparación (NWR), pero es seguro seguir utilizándolo, puede ser reincorporado al servicio. En caso de que se detecte un daño, como un corte por roca, el sistema identificará la separación y registrará sus características en cada etapa del proceso, lo que permite monitorizar su evolución. Utilizando modelos de aprendizaje automático, el sistema proyecta el crecimiento del daño y predice el momento adecuado para reemplazar el neumático, maximizando así su vida útil de manera segura. Esta previsión facilita la planificación anticipada de la inactividad del vehículo y optimiza la



gestión del inventario de neumáticos, reduciendo el tiempo de inactividad del equipo y generando ahorros significativos en los costos operativos (OPEX). [39]

Al predecir la evolución del daño en los neumáticos, se pueden mitigar muchos de los riesgos relacionados con los neumáticos calientes e incendios. Sin embargo, siempre existe la posibilidad de que ocurran eventos de neumáticos calientes. El sistema de inteligencia artificial Pitcrew es capaz de detectar neumáticos en sobrecalentamiento y alertar de inmediato al personal a través de correo electrónico, SMS u otras opciones de comunicación. Esta notificación temprana permite aislar rápidamente el vehículo, lo que contribuye a mejorar la seguridad en la mina. Además, el sistema proporciona la ventaja adicional de un sistema de inspección termográfica controlado remotamente, que permite evaluar un vehículo de forma remota, mejorando la visibilidad y la inteligencia durante cualquier incidente de seguridad en la mina. [39]

En muchos sitios que utilizan el sistema de inteligencia artificial Pitcrew, se instala un segundo sistema en la entrada del taller de neumáticos. Este sistema funciona como una capa de seguridad adicional, alertando al personal antes de que cualquier neumático que pueda estar caliente o potencialmente dañado ingrese al taller, lo que ayuda a prevenir riesgos y mejora la seguridad en el área de trabajo. [39]

El sistema de inteligencia artificial Pitcrew se complementa perfectamente con los sistemas de monitoreo de presión de neumáticos (TPMS). Muchos incendios de neumáticos comienzan en la carcasa externa, lo que a menudo no es detectado por los sensores de temperatura interna, como es el caso de un incendio de aceite en la banda de rodadura. El sistema Pitcrew es capaz de identificar de inmediato las anomalías térmicas en la capa superficial del neumático. Esta información puede ser transmitida directamente a las plataformas de gestión de flotas ya en funcionamiento, optimizando así la detección temprana de problemas y mejorando la seguridad. [39]

El sistema de inteligencia artificial Pitcrew ofrece un panel web fácil de usar, accesible desde cualquier ubicación con conexión a internet. La interfaz está optimizada para dispositivos móviles y usuarios con conexiones de red inestables, lo cual es común entre los usuarios en sitios mineros. El sistema proporciona un historial detallado de inspecciones y genera informes automatizados. Los datos recopilados ofrecen valiosos conocimientos sobre las operaciones de la mina, permitiendo monitorear la condición general del sitio. Por ejemplo, si se detecta un tipo de daño recurrente en una ubicación específica del neumático, se puede identificar que es necesario realizar mantenimiento en los caminos de acarreo, bancos o áreas de trabajo. Este enfoque de mantenimiento dirigido ayuda a reducir el daño en los neumáticos y otros componentes del camión, lo que contribuye a aumentar la productividad. [39]



En el mundo actual, donde todo está interconectado, un sistema solo puede ser verdaderamente efectivo si se integra de manera fluida con otros sistemas para crear un flujo de trabajo adaptado a las necesidades específicas de cada sitio. Pitcrew AI proporciona una API RESTful flexible que facilita la integración con sistemas de terceros. Esta API permite, por ejemplo, generar automáticamente órdenes de trabajo o boletos de trabajo para la inspección o reemplazo de neumáticos, así como establecer comunicación bidireccional con plataformas de software de gestión de flotas o de operaciones mineras. [39]

Además del daño en los neumáticos, muchos problemas mecánicos también se manifiestan como anomalías térmicas, que pueden ser detectadas por la solución Pitcrew AI. Por ejemplo, una asimetría térmica en los puntales de la suspensión podría señalar una carga desequilibrada en el vehículo. Asimismo, una diferencia de temperatura entre las unidades de transmisión final podría indicar un posible fallo mecánico o un problema relacionado con los frenos. Estas detecciones permiten identificar y abordar problemas antes de que se conviertan en fallos graves, optimizando así la seguridad y el rendimiento del equipo. [39]

Pitcrew AI es capaz de identificar una amplia gama de problemas en los neumáticos con alta precisión. Detecta lesiones menores causadas por daños físicos provocados por rocas y escombros, separaciones por calor excesivo en la banda de rodadura y la carcasa, así como separaciones en los bordes de la banda originadas por cargas altas en curvas. Además, monitorea y reconoce excursiones y anomalías de temperatura en la superficie del neumático, ayudando a prevenir fallos antes de que se conviertan en problemas graves. [39]

Este sistema contribuye significativamente a mejorar la seguridad al reducir la exposición de los técnicos a riesgos innecesarios, minimizando inspecciones manuales en neumáticos OTR, que son recipientes de alta presión. Además, permite identificar daños de forma temprana, eliminando la posibilidad de incendios prevenibles y disminuyendo el riesgo de fallos catastróficos, garantizando así operaciones más seguras y confiables. [39]

Los beneficios que conllevan el uso de Pitcrew AI son el aumento en la productividad y una ganancia en la eficiencia, esto se logra por:

En cuanto al aumento de la productividad, Pitcrew AI permite maximizar la eficiencia operativa al evitar tiempos de inactividad del vehículo asociados con inspecciones rutinarias. Su capacidad para detectar daños automáticamente y realizar evaluaciones solo cuando es necesario reduce interrupciones innecesarias. Además, identifica en tiempo real problemas de mantenimiento en caminos de acarreo, como rocas sueltas, inclinaciones o defectos en el diseño del camino, lo que permite tomar medidas correctivas



rápidamente. También optimiza de manera segura las velocidades de acarreo al monitorear las temperaturas externas de la banda de rodadura, garantizando que esto no afecte la vida útil del neumático. [39]

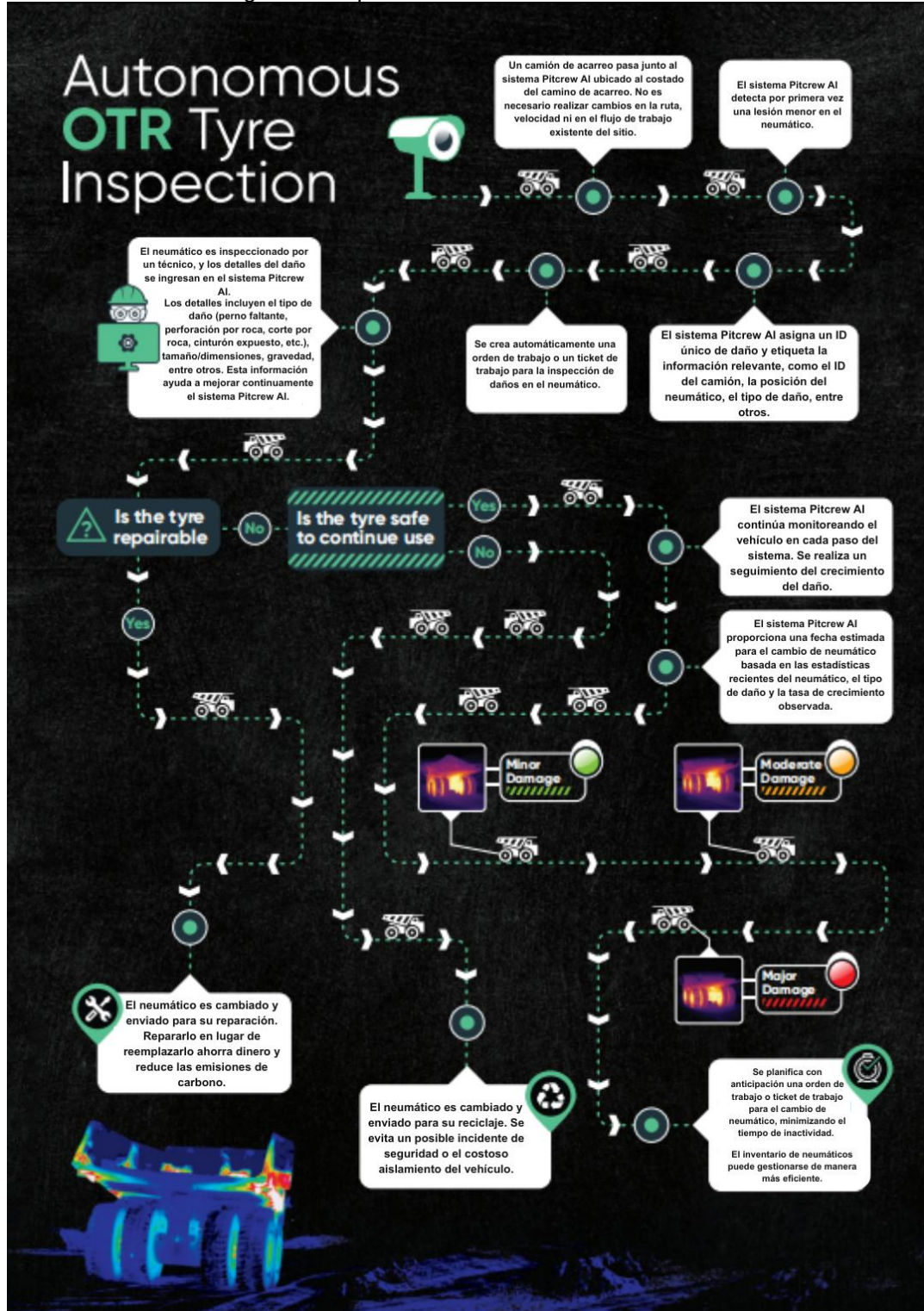
En cuanto a las ganancias de eficiencia, Pitcrew AI permite optimizar el uso del tiempo de los técnicos al enfocarse en inspecciones específicas y necesarias, eliminando la necesidad de revisiones rutinarias. Su capacidad para detectar daños tempranamente incrementa las tasas de reparación de neumáticos y reduce significativamente el costo promedio de reparación. Además, ofrece herramientas avanzadas para prever la progresión de los daños, facilitando la planificación de cambios de neumáticos y una gestión más eficiente del inventario. También maximiza la vida útil operativa de los neumáticos dañados de forma irreparable mediante un monitoreo constante, así como un seguimiento y pronóstico precisos de los daños, garantizando una mayor eficiencia en las operaciones. [39]

Otras ventajas que posee el uso de Pitcrew AI es la reducción en los tiempos de inactividad no programada esto es debido a que ayuda a planificar con anticipación los cambios de neumáticos y el tiempo de inactividad del vehículo, ayuda a detectar daños a tiempo, rastrear y prever su progresión. Además, ayuda a evitar eventos de sobrecalentamiento de neumáticos mediante una planificación de cambios antes de que ocurran excursiones térmicas. [39]

También, ayuda a la sostenibilidad ambiental, ya que las reparaciones utilizan menos materias primas y energía de producción en comparación a fabricar neumáticos nuevos. Esto se traduce en una reducción significativa en las emisiones de carbono y contribuye a alcanzar los objetivos de sostenibilidad. [39]

Por último, el Pitcrew AI supera las limitaciones de las inspecciones manuales, ya que los técnicos no pueden revisar toda la superficie de la banda de rodadura de un vehículo estacionado de manera eficiente. Con inspecciones automatizadas, consistentes y repetibles, el sistema garantiza una mayor precisión y confiabilidad en la detección de daños. Además, ofrece integraciones flexibles con los sistemas de gestión de neumáticos existentes, permitiendo una adaptación sencilla y optimizando los procesos de mantenimiento y control. [39]

Imagen 15. Inspección Autónoma de Neumáticos OTR



Fuente: pitcrew.ai, Pitcrew Mining Flyer (2024)



Las especificaciones son:

### **Capacidades del Sistema**

1. Detección avanzada de daños: Capacidad para identificar daños y separaciones en la banda de rodadura de los neumáticos, especialmente en los neumáticos traseros de los camiones de acarreo (posiciones 3, 4, 5, 6).
2. Monitoreo de temperatura: Seguimiento continuo de la temperatura en la superficie del neumático para detectar anomalías que puedan indicar riesgos potenciales, como sobrecalentamientos.
3. Inspección de neumáticos delanteros: Inspección opcional de los neumáticos delanteros (posiciones 1 y 2) para una cobertura completa.
4. Evaluación cualitativa de la banda de rodadura: Capacidad para realizar un análisis detallado del estado de la banda de rodadura, evaluando su desgaste y posibles daños.
5. Inspección mecánica del vehículo: Inspección de componentes clave del vehículo, como asimetría del tren motriz, desequilibrio en la carga del soporte de suspensión, y otros elementos mecánicos críticos que puedan afectar el rendimiento.
6. Cobertura de vehículos adicionales: Posibilidad de inspeccionar otros tipos de vehículos más allá de los camiones de acarreo, extendiendo la utilidad del sistema a una flota diversa.
7. Pronóstico de daños: Predicción del crecimiento de los daños en los neumáticos, permitiendo planificar con antelación cambios y reparaciones, lo que reduce tiempos de inactividad. Esto requiere integración con el sistema de gestión de neumáticos para un seguimiento y programación precisos.

### **Ambiental**

- El equipo está diseñado para operar en una amplia gama de condiciones ambientales. La configuración estándar es adecuada para temperaturas operativas que van desde  $-15^{\circ}\text{C}$  hasta  $+50^{\circ}\text{C}$  ( $+5^{\circ}\text{F}$  a  $+122^{\circ}\text{F}$ ), lo que permite su uso en la mayoría de los entornos exteriores y de minería. Para climas más fríos, se ofrece una configuración especial que soporta temperaturas ambientales de hasta  $-51^{\circ}\text{C}$  a  $+60^{\circ}\text{C}$  ( $-60^{\circ}\text{F}$  a  $+140^{\circ}\text{F}$ ).
- En cuanto a la protección, el equipo cuenta con una clasificación estándar de protección contra la entrada (IP66), lo que lo hace resistente al polvo y a chorros de agua a alta presión. Además, está disponible una configuración especial con protección IP69K, ideal para entornos de alta exposición.

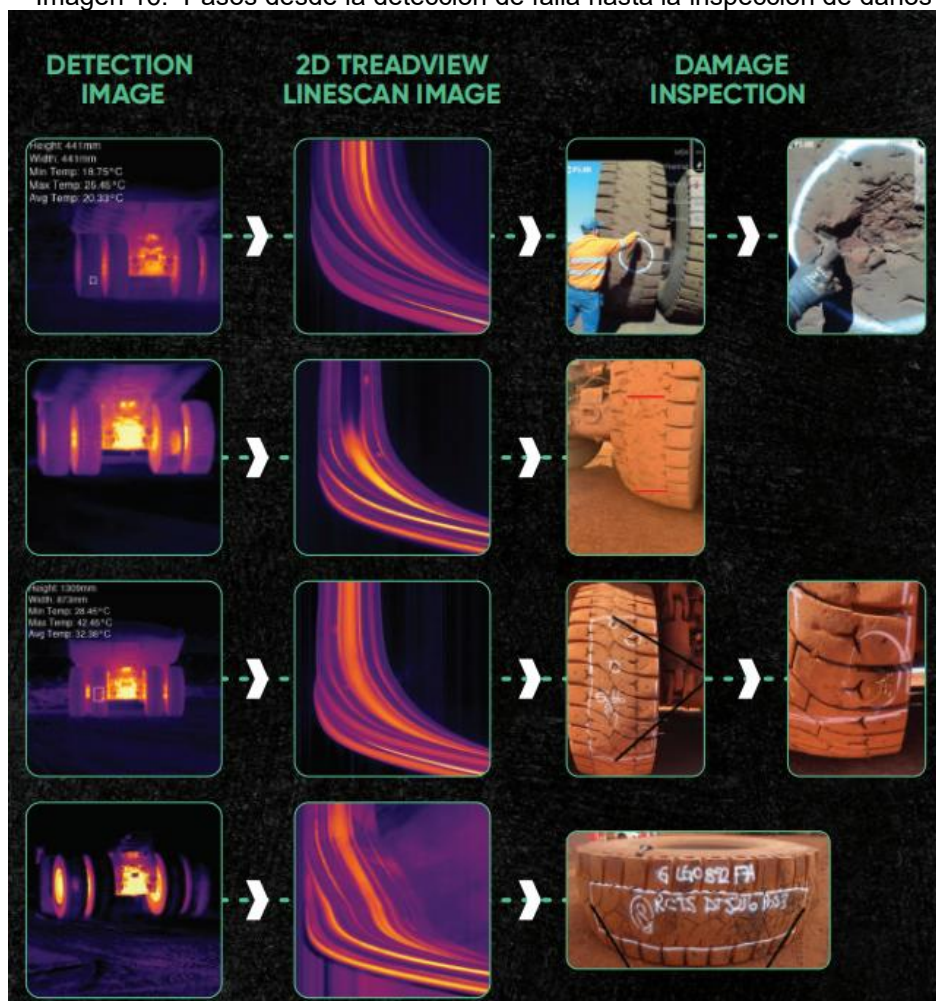
- El equipo está diseñado para instalaciones en áreas de bajo voltaje y áreas seguras. Para entornos más peligrosos (Zona 1), existe una versión que cumple con las certificaciones IECEx/ATEX, asegurando su seguridad y fiabilidad en lugares con riesgos de explosión.

### Integraciones

Pitcrew AI ofrece una API RESTful (Open API, Swagger) con documentación completa. Además, ya cuenta con integraciones existentes para muchos sistemas TPMS (Sistema de Monitoreo de Neumáticos), TMS (Sistema de Gestión de Neumáticos) y software de gestión de flotas.

Si se requiere, Pitcrew AI también ofrece un servicio de integración personalizada para facilitar la integración estrecha del sistema con los flujos de trabajo existentes en su sitio, asegurando que el sistema funcione de manera fluida dentro de su infraestructura operativa.

Imagen 16. Pasos desde la detección de falla hasta la inspección de daños



Fuente: pitcrew.ai, Pitcrew Mining Flyer (2024)



### 9.3. Sistema de monitoreo de presión y temperatura (TPMS)

En la tesis “IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA TPMS Y SU IMPACTO EN LA VIDA ÚTIL DE NEUMÁTICOS GIGANTES DE CAMIONES CATERPILLAR 793 EN UNA EMPRESA MINERA” de Elder Orlando Gutierrez Villena (2020) proporciona una idea para mitigar el desgaste prematuro de los neumáticos lo que afecta a la vida útil de estos, que es el uso de un sistema de monitoreo de presión y temperatura (TPMS).

#### ➤ ¿Que es TPMS?

Según Gutierrez (2020, p20), TPMS es un sistema que nos permite realizar mediciones de presión y temperatura de los neumáticos en tiempo real, además de medir la velocidad debido a que tiene incorporado un GPS que guarda toda la información en un mapa satelital.

El sistema incluye la instalación de seis sensores, ubicados dentro de cada neumático antes de ser montados en el camión, junto con un acelerómetro y una antena. Estos tres componentes se conectan a un Hub instalado en la cabina del operador, encargado de recibir las señales, almacenarlas y enviarlas automáticamente a la nube. De esta manera, cualquier usuario en la mina, desde gerentes hasta las áreas de despacho, puede acceder a los datos en tiempo real. Además, las alertas se pueden recibir en cualquier lugar mediante una página web, correo electrónico o mensaje de texto, según las necesidades del usuario. (Gutierrez, E. 2020)

Este sistema nos permitirá supervisar las condiciones de los neumáticos de toda la flota de acarreo, proporcionando información detallada sobre su estado durante la operación. Esto contribuirá a optimizar la productividad, extender la vida útil de los neumáticos y, lo más importante, garantizar la seguridad, que es un aspecto fundamental en las operaciones mineras. (Gutierrez, E. 2020)

#### ➤ Optimización de procesos

Gutierrez (2020, p21) menciona que, la optimización de procesos implica evaluar detalladamente el flujo actual de trabajo con el fin de identificar actividades que podrían ejecutarse de manera más eficiente. Este análisis tiene como objetivo establecer metas claras, diseñar un flujo de trabajo optimizado, definir controles efectivos y garantizar una adecuada integración con otros procesos. Todo esto se realiza con el propósito de asegurar una entrega final que ofrezca un alto valor percibido al cliente, mejorando tanto la calidad como la eficiencia en cada etapa del proceso.

Además, Gutierrez agrega que, la mejora de procesos buscará identificar las causas subyacentes de los problemas y establecer soluciones efectivas para





corregirlos y mejorarlos. Esto se logrará mediante la creación de un nuevo flujo de proceso que represente el modelo óptimo de operación en el futuro.

Para llevar a cabo este enfoque, se pueden emplear diversas herramientas de mejora de procesos. En este caso, aplicaremos el ciclo de Deming, también conocido como el ciclo PDCA (Plan-Do-Check-Act), que proporciona una metodología estructurada para implementar mejoras continuas. Este ciclo se desglosa en las siguientes fases:

- Plan (Planificar): Identificar los problemas y las oportunidades de mejora, establecer objetivos y planificar las acciones necesarias para mejorar el proceso.
- Do (Hacer): Ejecutar las acciones planificadas en un entorno controlado o en pequeña escala para probar su efectividad.
- Check (Verificar): Evaluar los resultados de las acciones implementadas, analizando si se han alcanzado los objetivos y si se han solucionado las ineficiencias.
- Act (Actuar): Si los resultados son satisfactorios, estandarizar el cambio y aplicarlo a gran escala. Si no lo son, ajustar y repetir el ciclo hasta lograr la mejora deseada.

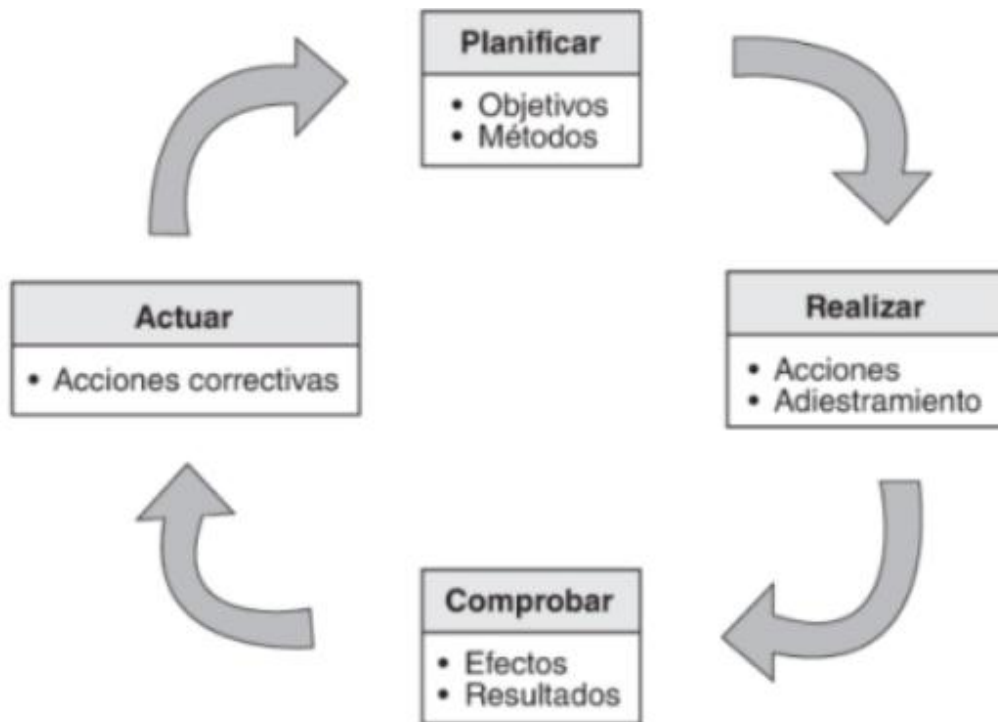
Este ciclo permite una mejora continua y sistemática, garantizando que el proceso evolucione hacia un rendimiento más eficiente y eficaz.

Es fundamental primero determinar si el proceso es realmente ineficiente, lo cual se puede hacer mediante un análisis exhaustivo de los KPIs (Indicadores Clave de Desempeño). Estos indicadores ofrecen una visión clara de cómo está funcionando el proceso y permiten identificar áreas de oportunidad para la mejora. Una vez identificadas las ineficiencias, el siguiente paso es optimizar las interacciones con el cliente, descubriendo las causas de los obstáculos que afectan la calidad o la eficiencia.

Asimismo, es necesario evaluar si los controles actuales son adecuados y si las reglas del negocio pueden mejorarse. En algunos casos, puede ser necesario establecer nuevas reglas o redefinir las existentes para alinearlas mejor con los objetivos del proceso optimizado. (Gutierrez, E. 2020)

Para asegurar que estos cambios sean efectivos y sostenibles, es recomendable utilizar herramientas tecnológicas que faciliten la visibilidad y difusión de los procesos. Estas herramientas permiten, además, la recolección de feedback de las personas involucradas, lo que proporciona una visión integral sobre las áreas de mejora y asegura que todos los actores estén alineados en cuanto a los objetivos del proceso. Esto contribuye a una mejora continua basada en datos reales y contribuciones directas del equipo. (Gutierrez, E. 2020)

Imagen 17. Ciclo de Deming



Fuente: Gutierrez, E. (2020)

Para llevar a cabo cada una de estas etapas fundamentales, se emplean diversas técnicas y herramientas de mejora continua, las cuales actúan como soporte y apoyo en la ejecución de las acciones necesarias. El ciclo PDCA (Planificar-Hacer-Verificar-Actuar) permite implementar de manera sistemática, utilizando las herramientas adecuadas, la prevención y resolución de problemas. Este ciclo no es un proceso aislado, sino que se repite continuamente. Una vez que se completa una iteración, se inicia una nueva, creando así una espiral de mejora continua. (Gutierrez, E. 2020)

El ciclo de Deming es una aplicación lógica que promueve realizar las actividades de manera ordenada y correcta. Su alcance no se limita únicamente a la implementación de la mejora continua, sino que es adaptable a una amplia variedad de situaciones y actividades. Gracias a su enfoque flexible y estructurado, el ciclo PDCA puede utilizarse en cualquier proceso donde sea necesario mejorar, controlar o corregir acciones, desde la gestión de calidad hasta la optimización de procesos operativos, pasando por la innovación en productos o servicios. (Gutierrez, E. 2020)

Gutierrez menciona que el sistema TPMS Este sistema permitirá monitorear de manera precisa la temperatura interna de los neumáticos, un factor clave para aumentar su vida útil. Además, ayudará a prevenir pérdidas prematuras por exceder los límites máximos de temperatura. El sistema se compone de sensores de presión y temperatura, los cuales están fijados a una base



imantada y se instalan dentro del neumático, adheridos al aro (parte externa). Estos sensores envían señales a una antena ubicada en la parte central inferior del eje posterior de cada camión.

Las mediciones se transmiten de forma inalámbrica al Hub instalado en la cabina del operador. Este Hub, que se conecta a la batería del camión (24V), tiene una batería interna que permite su funcionamiento por aproximadamente 8 horas en caso de que el camión esté apagado. El Hub transmite los datos hacia un sitio web utilizando señal 3G (gracias a una tarjeta SIM compatible con cualquier operador), lo que permite que el área correspondiente pueda monitorear y reportar la información en tiempo real. El sistema también incluye una antena triple (3G, WiFi, GPS), que no solo permite monitorear la velocidad y ubicación del camión, sino que también emite señal WiFi. Esta característica ofrece la posibilidad de conectar una pantalla o una Tablet dentro de la cabina como opción adicional, proporcionando una interfaz práctica para el operador o personal encargado. (Gutierrez, E. 2020)

Gutierrez entrega una planificación si se desea implementar el sistema, donde se destacan actividades de capacitación, la instalación misma del sistema TPMS y la verificación del funcionamiento de este:

Tabla 5. Programa de actividades para instalación

	Actividades	Pasos	Recursos	Tiempo
Día 1	Capacitaciones	Capac. A Personal técnico de Mantto. y Op. Mina	01 Especialista del sistema, Laptop, Internet, Proyector.	4 Horas
Día 2		Capac. A Jefes y Supervisores de área	01 Especialista del sistema, Laptop, Internet, Proyector.	3 Horas
Día 2	Instalación del sistema TPMS	Instalación de Hub en cabina	01 Técnico electricista, Herramientas, Hub, cables.	40 min
Día 2		Conexión del Hub a fuente de energía	01 Técnico electricista, Herramientas, cable de poder, conectores, fuente de energía de 24V	15 min
Día 2		Instalación de antena de sensores	01 Técnico electricista, Herramientas, antena de sensores, cable coaxial	30 min
Día 2		Instalación de antena triple (3G, Wifi, GPS)	01 Técnico electricista, Herramientas, antena triple, cable coaxial	45 min
Día 2		Instalación de sensores en neumáticos	01 técnico de llantas, sensor, pértiga de instalación.	45 min
Día 2		Montaje de neumáticos con sensores instalados	03 técnicos de llantas, Herramientas, neumáticos con sensores, gatas hidráulicas, manipulador de llantas.	6 horas
Día 2	Verificación	Configuración del sistema	01 Especialista del sistema, Laptop, internet, teléfono	30 min
Día 2		Configuración de niveles de alertas	01 Especialista del sistema, Laptop, internet, teléfono	15 min
Día 2		Comprobación de envío de mediciones	01 Especialista del sistema, Laptop, internet, teléfono	15 min

Fuente: Gutierrez, E. (2020)



Gutierrez establece responsables para la implementación de este sistema donde las Superintendencias de las áreas de Operaciones Mina y Mantenimiento Mina serán las encargadas de delegar responsabilidades al personal involucrado en el manejo de los neumáticos en cada una de sus áreas. Cada Superintendencia tendrá un rol específico: una supervisará el monitoreo y seguimiento del sistema (software), mientras que la otra se encargará de la instalación y el mantenimiento del hardware para asegurar el correcto funcionamiento del sistema.

En esta fase de implementación, es crucial coordinar capacitaciones tanto para el personal encargado de la instalación y el mantenimiento del sistema, como para aquellos responsables del monitoreo del estado de los neumáticos. Estas capacitaciones garantizarán que el personal esté preparado para reportar, comunicar y tomar medidas adecuadas en caso de que el sistema genere alertas o se presente algún mal funcionamiento. (Gutierrez, E. 2020)

#### **9.4. Programa de Capacitación para Operadores: Buenas Prácticas de Conducción en Minería**

➤ **Objetivo:**

Proporcionar a los operadores las herramientas necesarias para optimizar la conducción de equipos en las operaciones mineras, con un enfoque en la seguridad, la eficiencia operativa, el cuidado del equipo y la maximización de la vida útil de los neumáticos.

➤ **Estructura del programa:**

1. Introducción y Técnicas Básicas de Conducción

● **Módulo A: Introducción a las Buenas Prácticas de Conducción**

- ◆ Importancia de la seguridad, eficiencia y cuidado del equipo.
- ◆ Impacto de las malas prácticas en la seguridad y costos operativos.

● **Módulo B: Técnicas de Conducción en Diferentes Terrenos**

- ◆ Conducción en superficies rocosas, húmedas, con barro, y en pendientes.
- ◆ Estrategias para mantener estabilidad y evitar accidentes.

● **Módulo C: Uso Eficiente del Acelerador y Freno**

- ◆ Técnicas para mantener una velocidad constante y evitar aceleraciones y frenadas bruscas.



- 
- **Módulo D: Cuidado de los Neumáticos y Componentes del Equipo**
    - ◆ Recomendaciones para evitar sobrecalentamientos de neumáticos.
    - ◆ Técnicas para el manejo que prolongue la vida útil de los neumáticos y equipos.
  - 2. Implementación de Herramientas de Monitoreo y Capacitación Práctica
  - **Módulo E: Monitoreo de Neumáticos y Herramientas Tecnológicas**
    - ◆ Funcionamiento del sistema de monitoreo de neumáticos.
    - ◆ Cómo interpretar alertas y actuar ante problemas detectados.
  - **Módulo F: Simulaciones Prácticas de Conducción en Terreno**
    - ◆ Simulación de conducción en diferentes condiciones del terreno, integrando las prácticas aprendidas.
    - ◆ Aplicación del monitoreo de neumáticos en condiciones reales de operación.
  - **Módulo G: Evaluación Final y Retroalimentación**
    - ◆ Examen práctico y teórico sobre los conceptos cubiertos.
    - ◆ Retroalimentación individualizada para cada operador.
  - **Metodología:**
    - ◆ Teórica: Presentaciones interactivas, videos y discusión de casos.
    - ◆ Práctica: Simulaciones y prácticas en el terreno bajo supervisión.
    - ◆ Evaluación: Examen final práctico y teórico.
  - **Material de Apoyo:**
    - ◆ Manuales de buenas prácticas de conducción.
    - ◆ Guías rápidas sobre el monitoreo de neumáticos y mantenimiento preventivo.
    - ◆ Videos didácticos y tutoriales sobre el sistema de monitoreo.



---

### **Nota:**

El sistema Pitcrew AI destaca como la mejor propuesta para optimizar el uso de neumáticos en equipos mineros, ofreciendo ventajas claras en términos operativos, económicos y ambientales:

#### ➤ **Ventajas operacionales:**

1. Incrementa la seguridad al reducir inspecciones manuales en zonas de riesgo.
2. Automatiza el monitoreo 24/7, minimizando interrupciones operativas.
3. Detecta daños en etapas tempranas y permite prever fallas graves.
4. Mejora la planificación de mantenimiento, reduciendo tiempos de inactividad no programada y aumentando la productividad.

#### ➤ **Beneficios económicos:**

1. Reduce el costo promedio de reparación mediante el monitoreo constante y la detección temprana de problemas.
2. Extiende la vida útil de los neumáticos, disminuyendo los costos de reemplazo.
3. Optimiza la gestión de inventarios y el uso de recursos operativos, reduciendo costos operativos (OPEX).

#### ➤ **Impacto ambiental:**

1. Promueve la sostenibilidad al priorizar reparaciones sobre reemplazos, disminuyendo el uso de materias primas y energía.
2. Contribuye a la reducción de emisiones de carbono al minimizar la fabricación de neumáticos nuevos.

Pitcrew AI no solo aborda de manera eficiente los retos críticos asociados al desgaste de neumáticos en la minería, sino que también alinea sus ventajas con objetivos de sostenibilidad y eficiencia empresarial, consolidándolo como la opción más integral.



## 10. Viabilidad técnica y económica de uno de los sistemas de control propuestos, determinando 3 situaciones distintas que impacten el análisis.

### 10.1. Plan operacional y recursos

Para efectuar la evaluación económica, se desarrolló un plan operacional que contempló la identificación y asignación de los recursos y personal requeridos. En este contexto, se cuantificaron y desglosaron los costos asociados a cada elemento, los cuales se presentan de manera detallada en las tablas siguientes.

Tabla 6. Recursos considerados con sus respectivos costos en \$USD

Recursos	Costos en \$USD
Cintas de señalización, conos, pintura en spray	\$ 100,00
Herramientas manuales (taladros, destornilladores, etc.)	\$ 50,00
Cables de red o equipos de transmisión inalámbrica	\$ 2.000,00
Compactadora vibratoria	\$ 150,00
Herramientas manuales (palas, picos)	\$ 50,00
Computadora portátil con software de configuración	\$ 1.500,00
Equipos de diagnóstico (pruebas de red, sensores)	\$ 200,00

Fuente propia

Tabla 7. Personal considerados con sus respectivos sueldos y descuentos

Cargo Personal	Turno	Sueldos Líquidos	Sueldo Bruto	AFP	Salud	Mutual seguridad	Seguro cesantía
Ingeniero de proyectos	5x2 4x3	USD\$ 1.500,00	USD\$ 1.987,54	USD\$ 337,88	USD\$ 139,13	USD\$ 18,48	USD\$ 11,93
Topógrafo	5x2 4x3	USD\$ 1.300,00	USD\$ 1.722,54	USD\$ 292,83	USD\$ 120,58	USD\$ 16,02	USD\$ 10,34
Especialista en redes y telecomunicaciones	5x2 4x3	USD\$ 1.200,00	USD\$ 1.590,04	USD\$ 270,31	USD\$ 111,30	USD\$ 14,79	USD\$ 9,54
Administrador de contratos	5x2 4x3	USD\$ 2.850,00	USD\$ 3.776,33	USD\$ 641,98	USD\$ 264,34	USD\$ 35,12	USD\$ 22,66
Supervisor de seguridad	5x2 4x3	USD\$ 2.500,00	USD\$ 3.312,57	USD\$ 563,14	USD\$ 231,88	USD\$ 30,81	USD\$ 19,88
Operador de maquinaria pesada Pala	5x2 4x3	USD\$ 1.000,00	USD\$ 1.325,03	USD\$ 225,26	USD\$ 92,75	USD\$ 12,32	USD\$ 7,95
Maestro de obra	5x2 4x3	USD\$ 1.000,00	USD\$ 1.325,03	USD\$ 225,26	USD\$ 92,75	USD\$ 12,32	USD\$ 7,95
Ayudante de obra	5x2 4x3	USD\$ 700,00	USD\$ 927,52	USD\$ 157,68	USD\$ 64,93	USD\$ 8,63	USD\$ 5,57
Supervisor de servicios 1	7x7	USD\$ 1.800,00	USD\$ 2.385,05	USD\$ 405,46	USD\$ 166,95	USD\$ 22,18	USD\$ 14,31
Operario de terreno 1.1	7x7	USD\$ 850,00	USD\$ 1.126,28	USD\$ 191,47	USD\$ 78,84	USD\$ 10,47	USD\$ 6,76
Operario de terreno 1.2	7x7	USD\$ 850,00	USD\$ 1.126,28	USD\$ 191,47	USD\$ 78,84	USD\$ 10,47	USD\$ 6,76
Operario de terreno 1.3	7x7	USD\$ 850,00	USD\$ 1.126,28	USD\$ 191,47	USD\$ 78,84	USD\$ 10,47	USD\$ 6,76
Técnico de mantenimiento 1.1	7x7	USD\$ 1.100,00	USD\$ 1.457,53	USD\$ 247,78	USD\$ 102,03	USD\$ 13,56	USD\$ 8,75
Técnico en electrónica 1.1	7x7	USD\$ 1.500,00	USD\$ 1.987,54	USD\$ 337,88	USD\$ 139,13	USD\$ 18,48	USD\$ 11,93
Supervisor de servicios 2	7x7	USD\$ 1.800,00	USD\$ 2.385,05	USD\$ 405,46	USD\$ 166,95	USD\$ 22,18	USD\$ 14,31
Operario de terreno 2.1	7x7	USD\$ 850,00	USD\$ 1.126,28	USD\$ 191,47	USD\$ 78,84	USD\$ 10,47	USD\$ 6,76
Operario de terreno 2.2	7x7	USD\$ 850,00	USD\$ 1.126,28	USD\$ 191,47	USD\$ 78,84	USD\$ 10,47	USD\$ 6,76
Operario de terreno 2.3	7x7	USD\$ 850,00	USD\$ 1.126,28	USD\$ 191,47	USD\$ 78,84	USD\$ 10,47	USD\$ 6,76
Técnico de mantenimiento 2.1	7x7	USD\$ 1.100,00	USD\$ 1.457,53	USD\$ 247,78	USD\$ 102,03	USD\$ 13,56	USD\$ 8,75
Técnico en electrónica 2.1	7x7	USD\$ 1.500,00	USD\$ 1.987,54	USD\$ 337,88	USD\$ 139,13	USD\$ 18,48	USD\$ 11,93

Fuente propia



En la tabla 7 se puede apreciar los sueldos líquidos y brutos del personal y los respectivos descuentos, donde se puede apreciar los montos destinados a las AFP (17%), a la salud (7%), mutual de seguridad (0,93%) y por último el monto destinado a los seguros de cesantía (0,6%), datos a considerar en la evaluación económica.

## 10.2. Flota camiones CAEX Mina Gabriela Mistral

Se seleccionó una flota compuesta por 20 camiones de extracción (CAEX) pertenecientes a la División Gabriela Mistral, específicamente de la marca Komatsu y modelo 980E. Se elaboró una tabla detallada que incluye el tipo de neumático empleado por estos camiones, además de identificar las horas disponibles, las horas destinadas a mantenimiento y la disponibilidad física de la flota en función de los parámetros operacionales de la mina.

Tabla 8. Flota de 20 CAEX con su marca y modelo, sumado al tipo y marca de neumático que emplean destacando su durabilidad

Equipos	Marca	Modelo	Año	Marca neumático	Modelo neumático	Tipo de neumático	Durabilidad (teórica)	Durabilidad (real)
MGM-041	Komatsu	980E	2016	Bridgestone	MREV E3A	59/80R63	8000	5500
MGM-042	Komatsu	980E	2016	Bridgestone	MREV E3A	59/80R63	8000	5500
MGM-043	Komatsu	980E	2016	Bridgestone	MREV E3A	59/80R63	8000	5500
MGM-044	Komatsu	980E	2016	Bridgestone	MREV E3A	59/80R63	8000	5500
MGM-045	Komatsu	980E	2016	Bridgestone	MREV E3A	59/80R63	8000	5500
MGM-046	Komatsu	980E	2016	Bridgestone	MREV E3A	59/80R63	8000	5500
MGM-047	Komatsu	980E	2016	Bridgestone	MREV E3A	59/80R63	8000	5500
MGM-048	Komatsu	980E	2016	Bridgestone	MREV E3A	59/80R63	8000	5500
MGM-049	Komatsu	980E	2016	Bridgestone	MREV E3A	59/80R63	8000	5500
MGM-050	Komatsu	980E	2016	Bridgestone	MREV E3A	59/80R63	8000	5500
MGM-051	Komatsu	980E	2016	Bridgestone	MREV E3A	59/80R63	8000	5500
MGM-052	Komatsu	980E	2016	Bridgestone	MREV E3A	59/80R63	8000	5500
MGM-053	Komatsu	980E	2016	Bridgestone	MREV E3A	59/80R63	8000	5500
MGM-054	Komatsu	980E	2016	Bridgestone	MREV E3A	59/80R63	8000	5500
MGM-055	Komatsu	980E	2016	Bridgestone	MREV E3A	59/80R63	8000	5500
MGM-056	Komatsu	980E	2016	Bridgestone	MREV E3A	59/80R63	8000	5500
MGM-057	Komatsu	980E	2016	Bridgestone	MREV E3A	59/80R63	8000	5500
MGM-058	Komatsu	980E	2016	Bridgestone	MREV E3A	59/80R63	8000	5500
MGM-059	Komatsu	980E	2016	Bridgestone	MREV E3A	59/80R63	8000	5500
MGM-060	Komatsu	980E	2016	Bridgestone	MREV E3A	59/80R63	8000	5500

Fuente propia





Tabla 9. Indicadores Operativos y de Mantenimiento para Camiones por Mes

Hora de mantenimiento preventivo camión	Horas programadas mensuales	HN	DF (real)	DF mínima	DF máxima	Utilización efectiva meta	Utilización efectiva	HD	HEF	PO	Reserva	HM	HMCor	HMPre	N° de fallas	TMEF
2000	720	600	93%	80%	95%	95%	84%	558	468	90	0	42	36	6	16	29
2000	720	600	93%	80%	95%	95%	84%	558	468	90	0	42	36	6	16	29
2000	720	600	93%	80%	95%	95%	84%	558	468	90	0	42	36	6	16	29
2000	720	600	93%	80%	95%	95%	84%	558	468	90	0	42	36	6	16	29
2000	720	600	93%	80%	95%	95%	84%	558	468	90	0	42	36	6	16	29
2000	720	600	93%	80%	95%	95%	84%	558	468	90	0	42	36	6	16	29
2000	720	600	93%	80%	95%	95%	84%	558	468	90	0	42	36	6	16	29
2000	720	600	93%	80%	95%	95%	84%	558	468	90	0	42	36	6	16	29
2000	720	600	93%	80%	95%	95%	84%	558	468	90	0	42	36	6	16	29
2000	720	600	93%	80%	95%	95%	84%	558	468	90	0	42	36	6	16	29
2000	720	600	93%	80%	95%	95%	84%	558	468	90	0	42	36	6	16	29
2000	720	600	93%	80%	95%	95%	84%	558	468	90	0	42	36	6	16	29
2000	720	600	93%	80%	95%	95%	84%	558	468	90	0	42	36	6	16	29
2000	720	600	93%	80%	95%	95%	84%	558	468	90	0	42	36	6	16	29
2000	720	600	93%	80%	95%	95%	84%	558	468	90	0	42	36	6	16	29
2000	720	600	93%	80%	95%	95%	84%	558	468	90	0	42	36	6	16	29
2000	720	600	93%	80%	95%	95%	84%	558	468	90	0	42	36	6	16	29
2000	720	600	93%	80%	95%	95%	84%	558	468	90	0	42	36	6	16	29
2000	720	600	93%	80%	95%	95%	84%	558	468	90	0	42	36	6	16	29
2000	720	600	93%	80%	95%	95%	84%	558	468	90	0	42	36	6	16	29
2000	720	600	93%	80%	95%	95%	84%	558	468	90	0	42	36	6	16	29

Fuente propia

Esta tabla presenta métricas clave relacionadas con la disponibilidad y utilización efectiva de los camiones, considerando las horas programadas y no programadas (HN), la disponibilidad física (DF) real, mínima y máxima, y la utilización efectiva de 93%. Los indicadores de desempeño operativo (HD, HEF, PO) se mantienen consistentes. No obstante, la cantidad constante de fallas mensuales de 16 y el tiempo medio entre fallas (TMEF) de 29 horas destacan la importancia de mejorar las estrategias de mantenimiento predictivo y correctivo para reducir la frecuencia de interrupciones operativas y optimizar la productividad.

### 10.3. Planificación operativa

Ulteriormente, se realizó la planificación operativa detallada de los turnos asignados a cada trabajador, destacando la distribución específica de días laborables durante un mes inicial. Esta planificación permite visualizar de manera estructurada la programación de actividades. La información correspondiente se presenta de manera sistemática en la tabla que se expone a continuación, facilitando el análisis:

La Tabla 10 presente en el anexo, muestra la asignación específica de turnos para cada cargo durante un mes, diferenciando días laborables (en verde) y días de descanso (en rojo). Este esquema es esencial para garantizar la continuidad operativa, optimizar la productividad y prevenir la sobrecarga laboral del personal.



Tabla 11. Resumen horas trabajadas y valor hora hombre por cargo

Cargo Personal	Turno	Cant. dias trabajados	Total	Total Horas	Valor HH
			Horas/dias		
Ingeniero de proyectos	5x2 4x3	21	8,8	184,8	\$ 8,12
Topógrafo	5x2 4x3	9	8,8	79,2	\$ 16,41
Especialista en redes y telecomunicaciones	5x2 4x3	21	8,8	184,8	\$ 6,49
Administrador de contratos	5x2 4x3	21	8,8	184,8	\$ 15,42
Supervisor de seguridad	5x2 4x3	21	8,8	184,8	\$ 13,53
Operador de maquinaria pesada Pala	5x2 4x3	21	8,8	184,8	\$ 5,41
Maestro de obra	5x2 4x3	21	8,8	184,8	\$ 5,41
Ayudante de obra	5x2 4x3	21	8,8	184,8	\$ 3,79
Supervisor de servicios 1	7x7	15	9	135	\$ 13,33
Operario de terreno 1.1	7x7	15	9	135	\$ 6,30
Operario de terreno 1.2	7x7	15	9	135	\$ 6,30
Operario de terreno 1.3	7x7	15	9	135	\$ 6,30
Técnico de mantenimiento 1.1	7x7	15	9	135	\$ 8,15
Técnico en electrónica 1.1	7x7	15	9	135	\$ 11,11
Supervisor de servicios 2	7x7	16	9	144	\$ 12,50
Operario de terreno 2.1	7x7	16	9	144	\$ 5,90
Operario de terreno 2.2	7x7	16	9	144	\$ 5,90
Operario de terreno 2.3	7x7	16	9	144	\$ 5,90
Técnico de mantenimiento 2.1	7x7	16	9	144	\$ 7,64
Técnico en electrónica 2.1	7x7	16	9	144	\$ 10,42

Fuente propia

La Tabla 11, complementa la planificación de la tabla 10 (anexo) con un desglose de métricas clave, que incluye el número total de días trabajados, horas por día, el total de horas acumuladas por día trabajado y el valor económico hora hombre (HH) para cada cargo. Estos datos son cruciales para evaluar los costos operativos asociados al recurso humano y facilitar la evaluación económica.

#### 10.4. Tasa de descuento

Se establecieron variables económicas bajo tres escenarios distintos: optimista, normal y pesimista. Estos escenarios consideran parámetros como la tasa de descuento, el costo de capital, la ganancia esperada para los socios y el porcentaje de financiamiento mediante préstamos, además del impuesto de 27% en los tres casos. La información se organiza de forma sistemática en la tabla que se presenta a continuación, permitiendo una visualización clara y estructurada para el análisis:



Tabla 12. Parámetros base para el cálculo de la tasa de descuento en escenarios financieros

		Optimista	Normal	Pesimista
	Costo capital	6%	12%	20%
	Ganancia socios	5%	10%	15%
	Porcentaje de prestamo	70%	60%	50%
	Impuesto 27%	27%	27%	27%
i	Tasa descuento	4,57%	9,26%	14,80%

Fuente propia

La tabla 12 presenta los parámetros utilizados para determinar la tasa de descuento (i) en tres escenarios: optimista, normal y pesimista, en el contexto de la evaluación económica de un proyecto minero. El costo de capital, que refleja la tasa mínima de retorno exigida por los inversionistas, varía entre 6% en el escenario optimista, 12% en el normal y 20% en el pesimista, incrementándose conforme aumenta el riesgo. La ganancia esperada por los socios, que representa el retorno exigido por los accionistas, se proyecta en 5%, 10% y 15% para los escenarios optimista, normal y pesimista, respectivamente.

En cuanto al porcentaje de financiamiento por préstamo, se considera un 70% en el escenario optimista, reduciéndose a 60% en el normal y 50% en el pesimista, indicando un mayor uso de capital propio en condiciones más adversas. La tasa de impuesto, fijada en un 27%, permanece constante en todos los escenarios. Como resultado de la combinación de estos factores, la tasa de descuento (i) calculada es de 4,57% en el escenario optimista, 9,26% en el normal y 14,80% en el pesimista, valores que se emplean para descontar los flujos de caja futuros del proyecto y evaluar su viabilidad bajo diferentes condiciones de riesgo y financiamiento.

### 10.5. Q de equilibrio

Se procedió a calcular el “Q” de equilibrio para la venta de cámaras y para un servicio de monitoreo, ambos fueron considerados para la evaluación, esto ayuda a saber cómo asignar recursos eficientemente en un mercado y también ayuda a evaluar como cambios en factores como costos de producción pueden afectar el equilibrio de mercado. Dichos cálculos se hicieron con los datos obtenidos en las tablas 6 y 7, la tabla obtenida se mostrara a continuación:



Tabla 13. Q equilibrio servicio de monitoreo

Monitoreo	
Costo Fijo	USD\$ 6.393,27
Ingresos unitario	USD\$ 1.196,11
Costos Variables unitario	USD\$ 1.087,37
% Ganancia	10%
Q Equilibrio	59

Fuente propia

La tabla 13 muestra el Q de equilibrio asociado al servicio de monitoreo, donde se destaca el costo fijo de USD\$ 6.393, los ingresos unitario de USD\$ 1.196, costos variables unitarios de USD\$ 1.087 y el porcentaje de ganancia que se espera del 10% de los costos variables unitarios. Finalmente, se obtiene la cantidad de equilibrio de 59 unidades, esto indica que es necesario monitorear al menos esta cantidad para cubrir costos totales.

Tabla 14. Q de equilibrio servicio de cámara

Camara	
Costo Fijo	USD\$ 30.797,69
Ingresos unitario	USD\$ 5.576,13
Costos Variables unitario	USD\$ 5.069,21
% Ganancia	10%
Q Equilibrio	61

Fuente propia

La tabla 14 muestra el Q de equilibrio asociado al servicio de cámaras, donde se destaca el costo fijo de USD\$ 30.797, los ingresos unitario de USD\$ 5.576, costos variables unitarios de USD\$ 5.069 y el porcentaje de ganancia que se espera del 10% de los costos variables unitarios. Al igual que en la tabla 13, se obtiene la cantidad de equilibrio de 61 unidades, esto indica que es necesario al menos instalar esta cantidad de cámaras para cubrir costos totales.

## 10.6. Costos e ingresos

Algunos de los valores necesarios para el calculo de los costos fijos de la instalación de cámaras son los mostrados en las tablas 6 y 7, para el caso del servicio de monitoreo los valores utilizados son los de la tabla 7, los cálculos de los costos fijos obtenidos se mostraran en las siguientes tablas:



Tabla 15. Costo fijo (Total) instalación de cámaras

Ingeniero de proyectos	USD\$ 1.987,54
Especialista en redes y telecomunicaciones	USD\$ 1.590,04
Supervisor de seguridad	USD\$ 3.312,57
Técnico de mantenimiento 1.1	USD\$ 1.457,53
Transporte a faena	USD\$80,00
Alojamiento en faena	USD\$3.000,00
Comida (Desayuno, almuerzo, cena y colación)	USD\$11.970,00
Luz (kWh)	USD\$200,00
Agua	USD\$200,00
Servicio de oficina	USD\$2.500,00
Internet	USD\$500,00
Servicios de radio	USD\$1.000,00
Permiso de circulación	USD\$1.500,00
Revisión técnica	USD\$1.000,00
Extintores	USD\$500,00
Total	USD\$ 30.797,69

Fuente propia

Tabla 16. Costos fijos (Total) del servicio de monitoreo

Ingeniero de proyectos	USD\$ 1.987,54
Especialista en redes y telecomunicaciones	USD\$ 1.590,04
Supervisor de seguridad	USD\$ 828,14
Técnico en electrónica 1.1	USD\$ 1.987,54
Total	USD\$ 6.393,27

Fuente propia

Los costos variables unitarios del servicio de monitoreo e instalación de cámaras fueron calculados tomando valores de la tabla 7, dichos cálculos se mostraran en las siguientes tablas:

Para el calculo de los ingresos unitarios del servicio de monitoreo e instalación de cámaras, se calculo el 10% (ganancia) de costos variables unitarios de cada servicio y posteriormente a ese valor (costos variables unitarios) se le sumo el 10% previamente calculado, dando como resultado el ingreso unitario. Finalmente, para calcular el Q de equilibrio de cada servicio (Tabla 13 y 14) se utilizo la siguiente formula:

$$Q \text{ Equilibrio} = \frac{\text{Costo Fijo}}{(\text{Ingreso Unitario} - \text{Costo Variable Unitario})}$$

Ecuación 6. Q de Equilibrio



## 10.7. Gastos de administración, comercialización y financiamiento

Se calculo los gastos asociados a la administración, comercialización y financiamiento (prestamos) de cada situación a evaluar (Optimista, Normal y Pesimista), adicionalmente se calculo la depreciación y el valor residual presente, dichos cálculos se mostraran en las siguientes tablas:

Tabla 19. Gastos administración y arriendo de oficina

Administración	Cargo	Sueldo liquido	AFP	Salud	Mutual seguridad	Seguro cesantía	Suelo bruto
Recurso Humano	Jefe administración	USD\$ 2.000,00	USD\$ 340,00	USD\$ 140,00	USD\$ 18,60	USD\$ 12,00	USD\$ 2.650,41
	Asistente contabilidad	USD\$ 1.500,00	USD\$ 255,00	USD\$ 105,00	USD\$ 13,95	USD\$ 9,00	USD\$ 1.987,81
	Asistente RR.HH	USD\$ 1.000,00	USD\$ 170,00	USD\$ 70,00	USD\$ 9,30	USD\$ 6,00	USD\$ 1.325,21
	Seretaria ejecutiva	USD\$ 800,00	USD\$ 136,00	USD\$ 56,00	USD\$ 7,44	USD\$ 4,80	USD\$ 1.060,16
	Joven profesional	USD\$ 500,00	USD\$ 85,00	USD\$ 35,00	USD\$ 4,65	USD\$ 3,00	USD\$ 662,60
	Arriendo oficina	USD\$ 2.500,00				Total	USD\$ 7.686,19

Fuente propia

Los gastos de administración son fijos para las tres situaciones a evaluar. Se puede destacar que en los gastos de administración están presentes lo gastos en un jefe de administración, dos asistentes (contabilidad y recursos humanos), una secretaria ejecutiva y un joven profesional (ayudante del jefe de administración), por ultimo, al gasto de administración se le suman los costos fijos de la instalación de cámaras (tabla 14) y el del servicio de monitoreo (tabla 13).

Para el caso de comercialización se considero a un experto en marketing el cual generaría un gasto de USD\$ 3.000 al año (USD\$ 250 al mes).

Para el caso del financiamiento, se calcularon en las tres distintas situaciones considerando el porcentaje de préstamo de socios (Tabla 12), dichos cálculos se mostraran a continuación:



Tabla 20. Tabla de amortización caso pesimista

N°mes	Cuota mensual	Interes	Amortización	Saldo insoluto
0	0	0	0	\$ 1.975,00
1	\$98,95	\$ 30,24	\$68,72	\$ 1.906,28
2	\$98,95	\$ 29,18	\$69,77	\$ 1.836,51
3	\$98,95	\$ 28,12	\$70,84	\$ 1.765,67
4	\$98,95	\$ 27,03	\$71,92	\$ 1.693,75
5	\$98,95	\$ 25,93	\$73,02	\$ 1.620,72
6	\$98,95	\$ 24,81	\$74,14	\$ 1.546,58
7	\$98,95	\$ 23,68	\$75,28	\$ 1.471,30
8	\$98,95	\$ 22,52	\$76,43	\$ 1.394,87
9	\$98,95	\$ 21,35	\$77,60	\$ 1.317,27
10	\$98,95	\$ 20,17	\$78,79	\$ 1.238,49
11	\$98,95	\$ 18,96	\$79,99	\$ 1.158,49
12	\$98,95	\$ 17,74	\$81,22	\$ 1.077,27
13	\$98,95	\$ 16,49	\$82,46	\$ 994,81
14	\$98,95	\$ 15,23	\$83,72	\$ 911,09
15	\$98,95	\$ 13,95	\$85,01	\$ 826,08
16	\$98,95	\$ 12,65	\$86,31	\$ 739,77
17	\$98,95	\$ 11,33	\$87,63	\$ 652,14
18	\$98,95	\$ 9,98	\$88,97	\$ 563,17
19	\$98,95	\$ 8,62	\$90,33	\$ 472,84
20	\$98,95	\$ 7,24	\$91,72	\$ 381,12
21	\$98,95	\$ 5,83	\$93,12	\$ 288,00
22	\$98,95	\$ 4,41	\$94,55	\$ 193,46
23	\$98,95	\$ 2,96	\$95,99	\$ 97,46
24	\$98,95	\$ 1,49	\$97,46	\$ (0,00)

Fuente propia

La tabla 20 se detalla el esquema de pago de un préstamo de USD\$1.975 (50% de la inversión inicial) bajo un sistema de cuotas constantes a lo largo de 24 meses. Cada cuota mensual tiene un valor fijo de USD\$98.95 (Tasa interés efectiva mensual 1,53%), que incluye tanto el pago de intereses como la amortización del capital. En cada periodo, los intereses se calculan sobre el saldo insoluto del préstamo, de manera que este componente disminuye gradualmente con el tiempo, mientras que la amortización del capital aumenta progresivamente. El saldo insoluto, que refleja el monto pendiente por pagar después de cada cuota, comienza en USD\$1.975 y decrece hasta alcanzar USD\$0.00 en el último mes, indicando la liquidación total del préstamo.



Tabla 21. Tabla de amortización caso optimista

N°mes	Tabla de amortización			
	Cuota mensual	Interes	Amortización	Saldo insoluto
0	0	0	0	\$ 2.765,00
1	\$83,92	\$ 13,46	\$70,46	\$ 2.694,54
2	\$83,92	\$ 13,12	\$70,80	\$ 2.623,74
3	\$83,92	\$ 12,77	\$71,15	\$ 2.552,59
4	\$83,92	\$ 12,42	\$71,49	\$ 2.481,10
5	\$83,92	\$ 12,08	\$71,84	\$ 2.409,26
6	\$83,92	\$ 11,73	\$72,19	\$ 2.337,07
7	\$83,92	\$ 11,38	\$72,54	\$ 2.264,53
8	\$83,92	\$ 11,02	\$72,89	\$ 2.191,63
9	\$83,92	\$ 10,67	\$73,25	\$ 2.118,38
10	\$83,92	\$ 10,31	\$73,61	\$ 2.044,78
11	\$83,92	\$ 9,95	\$73,96	\$ 1.970,81
12	\$83,92	\$ 9,59	\$74,32	\$ 1.896,49
13	\$83,92	\$ 9,23	\$74,69	\$ 1.821,80
14	\$83,92	\$ 8,87	\$75,05	\$ 1.746,75
15	\$83,92	\$ 8,50	\$75,42	\$ 1.671,33
16	\$83,92	\$ 8,14	\$75,78	\$ 1.595,55
17	\$83,92	\$ 7,77	\$76,15	\$ 1.519,40
18	\$83,92	\$ 7,40	\$76,52	\$ 1.442,88
19	\$83,92	\$ 7,02	\$76,89	\$ 1.365,98
20	\$83,92	\$ 6,65	\$77,27	\$ 1.288,72
21	\$83,92	\$ 6,27	\$77,64	\$ 1.211,07
22	\$83,92	\$ 5,89	\$78,02	\$ 1.133,05
23	\$83,92	\$ 5,52	\$78,40	\$ 1.054,65
24	\$83,92	\$ 5,13	\$78,78	\$ 975,86
25	\$83,92	\$ 4,75	\$79,17	\$ 896,69
26	\$83,92	\$ 4,36	\$79,55	\$ 817,14
27	\$83,92	\$ 3,98	\$79,94	\$ 737,20
28	\$83,92	\$ 3,59	\$80,33	\$ 656,87
29	\$83,92	\$ 3,20	\$80,72	\$ 576,15
30	\$83,92	\$ 2,80	\$81,11	\$ 495,04
31	\$83,92	\$ 2,41	\$81,51	\$ 413,53
32	\$83,92	\$ 2,01	\$81,90	\$ 331,63
33	\$83,92	\$ 1,61	\$82,30	\$ 249,32
34	\$83,92	\$ 1,21	\$82,70	\$ 166,62
35	\$83,92	\$ 0,81	\$83,11	\$ 83,51
36	\$83,92	\$ 0,41	\$83,51	\$ 0,00

Fuente propia

La tabla 21 presentada corresponde a un análisis financiero basado en un préstamo de USD\$2.765, derivado de una inversión inicial de USD\$3.950, con un porcentaje financiado del 70%. El préstamo se amortiza a una tasa de interés efectiva anual del 6%, equivalente a una tasa mensual del 0.49%, y contempla cuotas mensuales constantes de USD\$83.92 durante un periodo de 36 meses.

El desglose muestra cómo las primeras cuotas se destinan en mayor proporción al pago de intereses, mientras que la amortización del capital es inicialmente menor en comparación al último mes. Sin embargo, a medida que avanza el tiempo, la proporción destinada a amortización incrementa, y los intereses disminuyen progresivamente debido a la reducción del saldo insoluto.





Tabla 22. Tabla de amortización caso normal

N°mes	Tabla de amortización			
	Cuota mensual	Interes	Amortización	Saldo insoluto
0	0	0	0	\$ 2.370,00
1	\$78,03	\$ 22,49	\$55,54	\$ 2.314,46
2	\$78,03	\$ 21,96	\$56,06	\$ 2.258,40
3	\$78,03	\$ 21,43	\$56,60	\$ 2.201,80
4	\$78,03	\$ 20,89	\$57,13	\$ 2.144,67
5	\$78,03	\$ 20,35	\$57,67	\$ 2.087,00
6	\$78,03	\$ 19,80	\$58,22	\$ 2.028,77
7	\$78,03	\$ 19,25	\$58,77	\$ 1.970,00
8	\$78,03	\$ 18,69	\$59,33	\$ 1.910,67
9	\$78,03	\$ 18,13	\$59,90	\$ 1.850,77
10	\$78,03	\$ 17,56	\$60,46	\$ 1.790,31
11	\$78,03	\$ 16,99	\$61,04	\$ 1.729,27
12	\$78,03	\$ 16,41	\$61,62	\$ 1.667,65
13	\$78,03	\$ 15,82	\$62,20	\$ 1.605,45
14	\$78,03	\$ 15,23	\$62,79	\$ 1.542,66
15	\$78,03	\$ 14,64	\$63,39	\$ 1.479,27
16	\$78,03	\$ 14,04	\$63,99	\$ 1.415,28
17	\$78,03	\$ 13,43	\$64,60	\$ 1.350,69
18	\$78,03	\$ 12,82	\$65,21	\$ 1.285,48
19	\$78,03	\$ 12,20	\$65,83	\$ 1.219,65
20	\$78,03	\$ 11,57	\$66,45	\$ 1.153,20
21	\$78,03	\$ 10,94	\$67,08	\$ 1.086,12
22	\$78,03	\$ 10,31	\$67,72	\$ 1.018,40
23	\$78,03	\$ 9,66	\$68,36	\$ 950,03
24	\$78,03	\$ 9,01	\$69,01	\$ 881,02
25	\$78,03	\$ 8,36	\$69,67	\$ 811,36
26	\$78,03	\$ 7,70	\$70,33	\$ 741,03
27	\$78,03	\$ 7,03	\$70,99	\$ 670,04
28	\$78,03	\$ 6,36	\$71,67	\$ 598,37
29	\$78,03	\$ 5,68	\$72,35	\$ 526,02
30	\$78,03	\$ 4,99	\$73,03	\$ 452,99
31	\$78,03	\$ 4,30	\$73,73	\$ 379,26
32	\$78,03	\$ 3,60	\$74,43	\$ 304,84
33	\$78,03	\$ 2,89	\$75,13	\$ 229,70
34	\$78,03	\$ 2,18	\$75,85	\$ 153,86
35	\$78,03	\$ 1,46	\$76,57	\$ 77,29
36	\$78,03	\$ 0,73	\$77,29	\$ (0,00)

Fuente propia

La tabla 22 presentada corresponde a un análisis financiero basado en un préstamo de USD\$2.370, derivado de una inversión inicial de USD\$3.950, con un porcentaje financiado del 60%. El préstamo se amortiza a una tasa de interés efectiva anual del 12%, equivalente a una tasa mensual del 0.95%, y contempla cuotas mensuales constantes de USD\$78.03 durante un periodo de 36 meses.

Al igual que en la tabla 21, el desglose muestra cómo las primeras cuotas se destinan en mayor proporción al pago de intereses, mientras que la amortización del capital es inicialmente menor al mes 36. Sin embargo, a medida que avanza el tiempo, la proporción destinada a amortización incrementa, y los intereses disminuyen progresivamente.



## 10.8. Depreciación y valor residual

Para la depreciación y valor residual, se calcularon para los tres casos a evaluar, dichos cálculos se mostraron en las siguientes tablas:

Tabla 23. Cálculo de depreciación anual y valor residual para caso normal

Inversiones	Valor residual	Valor Compra	Vida Útil (Año)	Depreciación
	\$ 592,50	\$ 3.950,00	5	\$ 671,50

Fuente propia

La tabla 23 muestra el valor residual el cual es calculado con el porcentaje que se puede recuperar de la inversión (USD\$3.950), en el caso normal se recuperaría un 15% (USD\$592.5). Para la depreciación, se considera la vida útil de los productos que son parte de la inversión, para el caso normal se estiman 5 años de vida útil, lo que da como resultado una depreciación de USD\$671.5

Tabla 24. Cálculo de depreciación anual y valor residual para caso optimista

Inversiones	Valor residual	Valor Compra	Vida Útil (Año)	Depreciación
	\$ 790,00	\$ 3.950,00	6	\$ 526,67

Fuente propia

La tabla 24 muestra el valor residual, que al igual que en la tabla 23 es calculado con el porcentaje que se puede recuperar de la inversión (USD\$3.950), en el caso optimista se recuperaría un 20% (USD\$790). Para la depreciación, la vida útil en el caso optimista se estiman 6 años, lo que da como resultado una depreciación de USD\$526,67.

Tabla 25. Cálculo de depreciación anual y valor residual para caso pesimista

Inversiones	Valor residual	Valor Compra	Vida Útil (Año)	Depreciación
	\$ 395,00	\$ 3.950,00	2	\$ 1.777,50

Fuente propia

La tabla 25 muestra el valor residual, que al igual que en las tablas anteriores (23 y 24) es calculado con el porcentaje que se puede recuperar de la inversión (USD\$3.950), en el caso pesimista se recuperaría un 10% (USD\$395). Para la depreciación, la vida útil para el caso pesimista se estima en 2 años, lo que da como resultado una depreciación de USD\$1.777,5.

Se destaca que el valor de compra (Inversión inicial) es igual en los tres casos, donde para calcularlo se suman los costos de:

- Herramientas manuales (Palas, picos, talabros, etc.): USD\$ 100
- Cables de red o equipos de transmisión inalámbrica: USD\$ 2.000
- Compactadora vibratoria: USD\$ 150
- Computadoras portátiles: USD\$ 1500
- Equipos de diagnóstico (pruebas de red, sensores): USD\$ 200



## 10.9. Plan de monitoreo para los casos a evaluar

Posterior a determinar el Q de equilibrio asociado al servicio de monitoreo, se elaboró un plan de monitoreo considerando tres escenarios: optimista, normal y pesimista. Para el escenario normal, se tomaron en cuenta las horas programadas de mantenimiento preventivo de los camiones CAEX, según los datos presentados en la Tabla 9, los cuales indican que, en promedio, cada camión ingresa a mantenimiento preventivo aproximadamente cada 4 meses, lo que equivale a 3 intervenciones anuales.

En el escenario pesimista, se proyectó una frecuencia de mantenimiento de 2 intervenciones por año (una cada 6 meses), lo que provocaría una disminución en la cantidad de monitoreos que se puede realizar al año en comparación al caso normal. Por otro lado, en el escenario optimista, se asumió una frecuencia de mantenimiento cada 2 meses, es decir, 6 intervenciones anuales por camión, lo que implica una mayor regularidad, incrementando la cantidad de posibles monitoreos que serían posibles realizar, lo que se traduce en que exista un aumento en la viabilidad del proyecto.

Dichos planes de monitoreo se presentan a continuación:

Tabla 26. Plan monitoreo caso normal

Pos neumáticos		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
MGM-041	Pos 1	X				X				X			
	Pos 2	X				X				X			
	MGM-045	Pos 3	X			X				X			
	MGM-049	Pos 4	X			X				X			
	MGM-053	Pos 5	X			X				X			
	MGM-057	Pos 6	X			X				X			
MGM-042	Pos 1		X			X					X		
	Pos 2		X			X					X		
	MGM-046	Pos 3		X		X					X		
	MGM-050	Pos 4		X		X					X		
	MGM-054	Pos 5		X		X					X		
	MGM-058	Pos 6		X		X					X		
MGM-043	Pos 1			X			X					X	
	Pos 2			X			X					X	
	MGM-047	Pos 3			X		X					X	
	MGM-051	Pos 4			X		X					X	
	MGM-055	Pos 5			X		X					X	
	MGM-059	Pos 6			X		X					X	
MGM-044	Pos 1				X			X					X
	Pos 2				X			X					X
	MGM-048	Pos 3			X			X					X
	MGM-052	Pos 4			X			X					X
	MGM-056	Pos 5			X			X					X
	MGM-060	Pos 6			X			X					X

Fuente propia

En la tabla 26 se muestra el plan de monitoreo de las inspecciones de los neumáticos para camiones MGM a lo largo de un horizonte temporal de 12 meses (el plan se proyecta de manera constante hasta los 80 meses), dicho plan se hizo considerando el caso normal. En la tabla, las filas representan



los camiones y la posición de los neumáticos de cada camión (Pos 1 a Pos 6), mientras que las columnas indican los meses de monitoreo. Las marcas "X" señalan que cada 4 meses, 5 camiones CAEX distintos reciben monitoreo en cada posición de neumático.

Tabla 27. Plan monitoreo optimista

	Pos Neumáticos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
MGM-041	Pos 1	X		X		X		X		X		X	
MGM-043	Pos 2	X		X		X		X		X		X	
MGM-047													
MGM-049	Pos 3	X		X		X		X		X		X	
MGM-051	Pos 4	X		X		X		X		X		X	
MGM-053													
MGM-055	Pos 5	X		X		X		X		X		X	
MGM-057	Pos 6	X		X		X		X		X		X	
MGM-059													
MGM-042	Pos 1		X		X		X		X		X		X
MGM-044	Pos 2		X		X		X		X		X		X
MGM-046													
MGM-048	Pos 3		X		X		X		X		X		X
MGM-050	Pos 4		X		X		X		X		X		X
MGM-052													
MGM-054	Pos 5		X		X		X		X		X		X
MGM-056	Pos 6		X		X		X		X		X		X
MGM-058													
MGM-060			X		X		X		X		X		X

Fuente propia

En la tabla 27, se muestra un plan de monitoreo de las inspecciones de los neumáticos para camiones MGM a lo largo de un horizonte temporal de 12 meses (el plan se proyecta de manera constante hasta los 80 meses), dicho plan se hizo considerando el caso optimista. Las marcas "X" señalan que cada 2 meses, 10 camiones CAEX distintos reciben monitoreo en cada posición de neumático.



Tabla 28. Plan monitoreo pesimista

Pos neumáticos		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
MGM-041	Pos 1	X						X					
	Pos 2	X						X					
	Pos 3	X						X					
	Pos 4	X						X					
	Pos 5	X						X					
	Pos 6	X						X					
MGM-042	Pos 1		X						X				
	Pos 2		X						X				
	Pos 3		X						X				
	Pos 4		X						X				
	Pos 5		X						X				
	Pos 6		X						X				
MGM-043	Pos 1			X						X			
	Pos 2			X						X			
	Pos 3			X						X			
	Pos 4			X						X			
	Pos 5			X						X			
	Pos 6			X						X			
MGM-044	Pos 1				X						X		
	Pos 2				X						X		
	Pos 3				X						X		
	Pos 4				X						X		
	Pos 5				X						X		
	Pos 6				X						X		
MGM-045	Pos 1					X						X	
	Pos 2					X						X	
	Pos 3					X						X	
	Pos 4					X						X	
	Pos 5					X						X	
	Pos 6					X						X	
MGM-046	Pos 1						X						X
	Pos 2						X						X
	Pos 3						X						X
	Pos 4						X						X
	Pos 5						X						X
	Pos 6						X						X

Fuente propia

En la tabla 28, se muestra un plan de monitoreo de las inspecciones de los neumáticos para camiones MGM a lo largo de un horizonte temporal de 12 meses (el plan se proyecta de manera constante hasta los 80 meses), dicho plan se hizo considerando el caso pesimista. Las marcas "X" señalan que en los meses 1, 2, 7 y 8, solo 4 camiones CAEX distintos reciben monitoreo en cada posición de neumático, mientras que en los meses restantes (3, 4, 5, 6, 9, 10, 11 y 12), solo 3 camiones distintos reciben monitoreo de neumáticos.



## 10.10. Evaluación económica para 3 casos distintos (normal, optimista y pesimista)

Una vez calculados los ingresos proyectados, los costos, los ingresos, los gastos fijos (incluyendo administración, financiamiento y comercialización), la depreciación, la amortización, el valor residual, la tasa de descuento, el capital de trabajo y la inversión inicial, se procedió a realizar la evaluación económica del proyecto bajo los tres escenarios considerados: normal, pesimista y optimista.

Los resultados de dichas evaluaciones se presentan en el anexo y sus interpretaciones se mostraran a continuación:

### ➤ Evaluación económica caso normal:

La tabla 29 (Anexo) muestra la evaluación económica en un periodo de 10 años para un escenario normal, donde se destaca el número de cámaras instaladas, donde el año 1 es de 6 cámaras instaladas y aumenta en un 23% cada año en relación al año anterior, llegando así al año 10 con 40 cámaras instaladas, también se destaca el servicio de monitoreo donde al año 1 se realizan 12 monitoreos y aumenta en un 21% cada año en relación al anterior, llegando al año 10 con 53 monitoreos anuales, cabe señalar que esta relación se basa en los mantenimientos preventivos calculados en la tabla 26.

Esta tabla nos señala también los ingresos (por venta, por instalación de cámaras, servicio de monitoreo) y los costos variables (por instalación de cámaras, servicio de monitoreo y otros costos variables como bonos extras), para calcular los ingresos de instalación de cámaras, se hizo una relación entre el ingreso unitario de la instalación de cámaras (tabla 14) y la cantidad de cámaras instaladas por año, los ingresos por monitoreo se hizo un relación similar, entre el ingreso unitario del monitoreo (tabla 13) y la cantidad de monitoreos realizados por año. El ingreso por venta es la obtenida en la tabla 23 (valor residual).

Los costos variables de la instalación de cámaras y el servicio de monitoreo fueron calculados con una relación similar a la utilizada en el calculo de los ingresos, la diferencia es que en este caso la relación es: para el costo de instalación de cámaras la relación es entre la cantidad de cámaras instaladas por año y el costo variable unitario (tabla 14) y para el costo del servicio de monitoreo la relación es entre la cantidad de monitoreos realizados por año y el costo variable unitario (tabla 13). Por último, los otros costos variables se determinaron en función a la diferencia en la instalación de cámaras que hay entre un año y el año anterior, por el ingreso unitario (tabla 14) y por un 5% que es el porcentaje de bono a entregar.



El margen bruto que aparece en la tabla se obtiene al realizar una resta entre delta ingreso menos el delta costo, obteniendo valores positivos crecientes desde el año 1 al año 10.

Los gastos fijos que se muestran están previamente calculados en las tablas 19 y 22. Cabe señalar que en la tabla 22 se visualiza el financiamiento del escenario normal. Por último, para el caso del gasto de comercialización, se considera a un experto en marketing que genera un gasto de USD\$ 3.000 al año (fijo desde el año 2 al año 10).

La depreciación, inversión (igual en los tres escenarios) y la amortización que se muestran en la tabla es la calculada en las tablas 23 y 22 respectivamente. Para el caso del capital de trabajo (es igual en los 3 escenarios) se considero los costos de los repuestos de las cámaras, un ingeniero de proyectos, un topografo, un especialista en redes, supervisor de seguridad, un operador de maquinaria pesada, maestro de obras, un ayudante de obras, supervisor de servicios, operario de terreno y un técnico en mantenimiento.

El flujo de caja presenta en la tabla es negativo desde el año 0 al año 4, recuperándose en el año 5 y aumentando hasta el año 10 llegando a un flujo de USD\$ 87.134, esto nos dice que el proyecto genera ganancias a partir del año 5.

La tasa de 9,26% mostrada en la tabla nos ayuda a determinar el valor actual neto (VAN) que es de USD\$ 43.874,98.

Por último, el valor de la Tasa Interna de Retorno (TIR) de 18% nos indica que el proyecto es factible siempre cuando la tasa de descuento no supere dicho valor, es decir, para que el proyecto genere ganancias y sea factible, la tasa de descuento debe ser menor a un 18%.

➤ Evaluación económica caso optimista:

La Tabla 30 (Anexo) presenta la evaluación económica proyectada en un horizonte de 10 años bajo un escenario optimista. En ella se resalta la progresión del número de cámaras instaladas, comenzando con 10 unidades en el año 1 y experimentando un incremento anual del 25%, alcanzando así 63 cámaras en el año 10. Asimismo, se detalla el servicio de monitoreo, que inicia con 15 inspecciones anuales en el primer año y crece a una tasa del 27% interanual, culminando en 121 monitoreos al año 10. Esta proyección se fundamenta en el modelo de mantenimiento preventivo especificado en la Tabla 27.

La tabla incluye los ingresos desglosados por concepto (venta, instalación de cámaras y servicios de monitoreo) y los costos variables (asociados a instalación, monitoreo y otros costos, como bonificaciones extraordinarias). Los ingresos por instalación de cámaras fueron estimados a partir de la



relación entre el ingreso unitario (Tabla 14) y la cantidad de cámaras instaladas por año. Para los ingresos por monitoreo, se utilizó un cálculo análogo basado en la tarifa unitaria (Tabla 13) y el volumen de monitoreos anuales. El ingreso por venta corresponde al valor residual calculado en la Tabla 24 que en el caso optimista es una vez al año.

Los costos variables asociados a instalación de cámaras y monitoreo se calcularon de forma análoga a los ingresos, utilizando la cantidad instalada y monitoreada anualmente y el costo variable unitario (Tablas 14 y 13, respectivamente). Por otro lado, los costos variables adicionales se determinaron considerando el incremento interanual en la instalación de cámaras, multiplicado por el ingreso unitario (Tabla 14) y un bono equivalente al 5% del valor.

El margen bruto reflejado en la tabla resulta de la diferencia entre el incremento en ingresos y el incremento en costos, mostrando una tendencia creciente de valores positivos desde el año 1 al año 10.

Los gastos fijos considerados están previamente estimados en las Tablas 19 y 21, siendo importante destacar que esta última incorpora los detalles de financiamiento para el escenario optimista. Adicionalmente, el gasto de comercialización incluye la contratación de un especialista en marketing con un costo fijo de USD\$ 3,000 anuales desde el año 2 hasta el año 10, aplicable también en los escenarios normal (tabla 29) y pesimista.

La depreciación y amortización corresponden a los cálculos presentados en las Tablas 24 y 21, respectivamente.

El flujo de caja proyectado presenta valores negativos desde el año 0 al año 3, recuperándose en el año 4 y alcanzando un saldo positivo acumulado de USD\$ 208,526 en el año 10. Esto indica que el proyecto comienza a generar ganancias sostenibles a partir del año 4.

La tasa de descuento del 4.57% utilizada en la evaluación permite obtener un Valor Actual Neto (VAN) de USD\$ 377,425.

Por último, la Tasa Interna de Retorno (TIR) del 45% sugiere que el proyecto es económicamente viable, siempre que la tasa de descuento aplicada no supere dicho umbral. En términos prácticos, esto implica que el proyecto generará beneficios siempre que la tasa de descuento sea inferior al 45%.

➤ Evaluación económica caso pesimista:

La Tabla 31 (Anexo) presenta una evaluación económica proyectada a 10 años bajo un escenario pesimista. Se destaca la progresión del número de cámaras instaladas, comenzando con 6 unidades en el año 1 y registrando un incremento anual del 23%, alcanzando 22 cámaras instaladas en el año 7, valor que se mantiene constante hasta el año 10. De igual manera, se detalla el servicio de monitoreo, que inicia con 12 inspecciones anuales en el primer





año y crece a una tasa del 16% interanual, alcanzando 38 monitoreos al año 10. Esta proyección se fundamenta en el esquema de mantenimiento preventivo descrito en la Tabla 28.

La tabla desglosa los ingresos en tres categorías: venta, instalación de cámaras y servicios de monitoreo, así como los costos variables relacionados con estos conceptos, incluyendo otros costos como bonificaciones extraordinarias. Los ingresos por instalación de cámaras fueron calculados mediante la relación entre el ingreso unitario (Tabla 14) y la cantidad de cámaras instaladas anualmente. De manera similar, los ingresos por monitoreo se estimaron a partir de la tarifa unitaria (Tabla 13) y el volumen de monitoreos anuales. El ingreso por venta corresponde al valor residual establecido en la Tabla 24, que en este escenario optimista se genera una vez por año.

Los costos variables relacionados con la instalación de cámaras y el monitoreo fueron calculados siguiendo la misma metodología que los ingresos, utilizando la cantidad instalada y monitoreada anualmente y el costo variable unitario (Tablas 14 y 13, respectivamente). Los costos variables adicionales se determinaron considerando el incremento interanual en la instalación de cámaras, multiplicado por el ingreso unitario (Tabla 14) y un bono del 5% del valor, aplicable únicamente hasta el año 7, dado que en los años siguientes no se registra un aumento en la cantidad de cámaras instaladas.

El margen bruto, muestra una tendencia creciente de valores positivos a lo largo del horizonte de análisis, desde el año 1 hasta el año 10.

Los gastos fijos fueron previamente calculados en las Tablas 19 y 20, siendo relevante destacar que la Tabla 20 incluye los detalles del financiamiento para el escenario pesimista.

La depreciación y amortización están basadas en los cálculos presentados en las Tablas 25 y 20, respectivamente.

El flujo de caja proyectado es negativo desde el año 0 hasta el año 5, pero se recupera en el año 6, acumulando un saldo positivo de USD\$ 54,547 al año 10. Esto refleja que el proyecto comienza a generar rendimientos sostenibles a partir del año 6.

Con una tasa de descuento del 14.8%, el Valor Actual Neto (VAN) proyectado es de USD\$ 26,820. Sin embargo, al compararlo con los otros escenarios, este valor es insuficiente, indicando que el proyecto no es viable económicamente bajo esta tasa de descuento.

Finalmente, la Tasa Interna de Retorno (TIR) del 6% confirma que el proyecto no es económicamente viable, ya que la tasa de descuento supera la TIR. En



UNIVERSIDAD  
**SAN SEBASTIAN**  
VOCACIÓN POR LA EXCELENCIA

**FACULTAD DE INGENIERÍA, TECNOLOGÍA, DISEÑO  
Y ARQUITECTURA  
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL EN MINAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA  
SEDE SANTIAGO – BELLAVISTA**

~~~~~  
términos prácticos, esto implica que el proyecto no generará beneficios  
mientras la tasa de descuento sea superior al 6%.



## 11. Conclusiones

La identificación de las variables que influyen en el desgaste de los neumáticos en camiones mineros (CAEX) fue un proceso clave para comprender las razones detrás de su deterioro prematuro. En este análisis se consideraron aspectos operacionales, ambientales y de diseño que afectan directamente la durabilidad de los neumáticos. Entre los factores más relevantes se encontraron la presión de inflado, la temperatura interna del neumático, la sobrecarga, la conducción de la maquinaria y el estado de las pistas de acarreo.

Se realizó un estudio exhaustivo de cada una de estas variables, evaluando su impacto y su relación con el desgaste. A través de este análisis se pudo determinar que ciertos factores, como la conducción agresiva y la falta de un monitoreo adecuado de la presión y temperatura, tienen una influencia significativa en la reducción de la vida útil de los neumáticos.

Con esta identificación detallada, se cumplió plenamente el Objetivo Específico 1, ya que se logró un diagnóstico preciso de los factores que inciden en el desgaste de los neumáticos. Esto sentó las bases para la implementación de estrategias de mitigación orientadas a mejorar la eficiencia operativa en la División Gabriela Mistral

El análisis y clasificación de las variables críticas permitió priorizar aquellas que tienen un mayor impacto económico, operativo y ambiental sobre la durabilidad de los neumáticos. Para ello, se aplicaron metodologías como el diagrama de Pareto y el diagrama de Ishikawa, lo que permitió visualizar de manera estructurada los factores más relevantes y su grado de influencia en el problema.

Este análisis permitió establecer una jerarquización de los riesgos asociados al desgaste, destacando que la sobrecarga, la conducción a altas velocidades y la presión de inflado inadecuada son las principales causas de fallos prematuros. Además, se evidenció que las condiciones del terreno, como la calidad del mantenimiento de las pistas y la exposición a temperaturas extremas, también contribuyen significativamente a la disminución de la vida útil de los neumáticos.

Con este proceso de clasificación, se logró cumplir el Objetivo Específico 2, ya que se establecieron las bases para la toma de decisiones en la gestión del mantenimiento y control del desgaste de los neumáticos. La información obtenida permitió definir estrategias de mitigación focalizadas en los factores con mayor incidencia en el problema, optimizando así la gestión de los recursos en la operación minera.



Una vez identificadas y clasificadas las variables críticas, se procedió a la elaboración de propuestas de diseño y medidas de control para mitigar el desgaste prematuro de los neumáticos en equipos mineros. Se propusieron diversas soluciones tecnológicas y operativas que permitieran mejorar la eficiencia y sostenibilidad del sistema de transporte en la mina.

Estas medidas fueron evaluadas desde una perspectiva técnica y operativa, demostrando que su implementación podría generar beneficios tanto en la reducción de costos como en la mejora de la seguridad y sostenibilidad en la operación minera.

Con la propuesta de estas soluciones, se cumplió el Objetivo Específico 3, ya que se definieron acciones concretas para minimizar el desgaste de los neumáticos y mejorar su eficiencia operativa en la División Gabriela Mistra

Para determinar la viabilidad de las medidas de control propuestas, se realizó un análisis técnico y económico que permitió evaluar su implementación en distintos escenarios. Se consideraron tres situaciones financieras posibles: optimista, normal y pesimista, lo que permitió obtener una visión realista de los costos y beneficios asociados a cada solución. Donde se incluyeron aspectos como los indicadores financieros (VAN y TIR), punto de equilibrio, etc.

Los resultados mostraron que para el caso normal, el proyecto es factible si los parámetros presentes como la tasa de descuento, se mantienen o bien aumenten sin superar la TIR. También nos mostró los otros dos casos donde varían diversos datos como la tasa de descuento, la cantidad de cámaras instaladas y la cantidad de monitoreos realizados, esto nos ayudo a identificar la variables importantes y sensibles en la evaluación, donde el mínimo cambio puede alterar la factibilidad del proyecto.

Con este análisis, se cumplió el Objetivo Específico 4, ya que se logró demostrar que la aplicación de un sistema de control para los neumáticos es económicamente justificable en un escenario normal y puede contribuir a mejorar la eficiencia de la operación minera.

El presente estudio permitió abordar de manera integral el problema del desgaste prematuro de los neumáticos en la División Gabriela Mistral, partiendo desde la identificación de los factores que lo provocan, pasando por su clasificación y análisis de impacto, hasta la propuesta de soluciones viables y su respectiva evaluación económica.

Gracias a este enfoque estructurado, se pudo demostrar que la implementación de sistemas de monitoreo y control, puede generar mejoras significativas en la eficiencia del uso de los neumáticos. Además, el análisis financiero realizado evidenció que esta solución es factible desde el punto de



~~~~~  
vista económico, permitiendo reducir costos operacionales y mejorar la seguridad en la mina.

Con todo lo anterior, se cumplió el Objetivo General del estudio, ya que se logró desarrollar un estudio de prefactibilidad para la implementación de un sistema de control de desgaste de neumáticos en camiones CAEX. Este sistema, basado en tecnología avanzada, permitirá optimizar el uso de los neumáticos, reducir costos asociados a fallos prematuros y mejorar la sostenibilidad de la operación minera en la División Gabriela Mistral, debido a que su función es prevenir pérdidas operacionales por desgaste prematuro de neumáticos.



## 12. Bibliografía

1. Howard L. Hartman, Jan M. Mutmansky, Richard C. V. Deering, & Robert L. Bullock (Eds.). (1992). SME Mining Engineering Handbook (2nd ed.). Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc.
2. Felsch Jr., W. S., Oliveira, A. F., & Ortiz, C. E. A. (2019). Approach of mining equipment performance with simulation of the use of autonomous trucks. En Mueller, R., & Merwe, C. (Eds.), Mining Goes Digital (pp. 542-550). Taylor & Francis Group. <https://doi.org/10.1201/9780429320774-62>
3. Taran, I., & Litvin V. (2018). Determination of rational parameters for urban bus route with combined operating mode. Transport Problems, 13(4), 157-171. <https://doi.org/10.20858/tp.2018.13.4.14>
4. Naumov, V., Zhamanbayev, B., Agabekova, D., Zhanbirov, Z., & Taran, I. (2021). Fuzzy-logic approach to estimate the passengers' preference when choosing a bus line within the public transport system. Communications – Scientific Letters of the University of Žilina, 23(3), A150-A157. <https://doi.org/10.26552/com.C.2021.3.A150-A157>.
5. Saukenova, I., Oliskevych, M., Taran, I., Toktamyssova, A., Aliakbarkyzy, D., & Pelo, R. (2022). Optimization of schedules for early garbage collection and disposal in the megapolis. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 1(3-115), 13-23. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.251082>.
6. Taran, I., & Bondarenko, A. (2017). Conceptual approach to select parameters of hydrostatic and mechanical transmissions for wheel tractors designed for agricultural operations. Archives of transport, 41(1), 89-100. <https://doi.org/10.5604/01.3001.0009.7389>.
7. Shakenov, A., Sadkowski, A., & Stolpovskikh, I. (2022). Haul road condition impact on tire life of mining dump truck. Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu, 6, 25-29. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2022-6/025>
8. Śładkowski, A., Utegenova, A., Kolga, A.D., Gavrishev, S.E., Stolpovskikh, I., & Taran, I. (2019). Improving the efficiency of using dump trucks under conditions of career at open mining works. Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu, (2), 36-42. <https://doi.org/10.29202/nvngu/2019-2/8>.
9. Lindeque, G.C. (2016). A critical investigation into tire life on an iron ore haulage system. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 116(40), 317-322. <https://doi.org/10.17159/2411-9717/2016/v116n4a3>.



10. Tannont, D.D., & Regensburg, B. (2001). Guidelines for mine haul road design. School of Mining and Petroleum Engineering, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Alberta. 1-115. <https://doi.org/10.14288/1.0102562>.
11. The Philippines in the natural rubber global value chain (2018). Policy briefs. Department of Trade and Industry. Series No. 2018-01, 1-8. Retrieved from <https://dtiwebfiles.s3.ap-southeast-1.amazonaws.com/uploads/2019/11/2018-01-The-Philippines-in-the-NaturalRubber-Global-Value-Chain.pdf>.
12. Saving forest at risk. WWF living forest report (2015). Chapter 5. Retrieved from [https://files.worldwildlife.org/wwfmsprod/files/Publication/file/5k667rhjnw\\_Report.pdf](https://files.worldwildlife.org/wwfmsprod/files/Publication/file/5k667rhjnw_Report.pdf).
13. Cutler, T. (2016). Dangerous misconceptions about earthmover tyre explosions. Technical bulletin, 2. Retrieved from <http://otrglobal.com.au/wp-content/uploads/2017/01/OTRG-Technical-bulletinTyre-explosion-misconceptions.pdf>.
14. Salehi, M., Cornish, K., Bahmankar, M., & Naghavi, M.R. (2021). Natural rubber-producing sources, systems, and perspectives for breeding and biotechnology studies of *Taraxacum kok-saghyz*. *Industrial Crops and Products*, 170, 113667. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113667>.
15. Xiang, K.-L., Xiang, P.-Y., & Wu, Y.P. (May 2014). Prediction of the fatigue life of natural rubber composites by artificial neural network approaches. *Materials & Design*, 57, 180-185. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.12.044>.
16. Kravchenko, A., Sanko, O., & Lukichov, A. (2012). Research of dynamics of tire wear of trucks and prognostication of their service life. *Transport Problems*, 7(4), 85-94. ISSN: 1896-0596.
17. Nurić, A., & Nurić, S. (2019). Numerical modeling of transport roads in open pit mines. *Journal of Sustainable Mining*, 18(1), 25-30. <https://doi.org/10.1016/j.jsm.2019.02.005>.
18. Soofastaei, A., Knights, P., & Kizil, M. (2017). Application of advanced data analytics to improve haul trucks energy efficiency in surface mines. In *Extracting Innovations*, 164-177. <https://doi.org/10.1201/b22353-12>.
19. Yarmuch, J.L., Brazil, M., Rubinstein, H., & Doreen, A.T. (2019). Optimum ramp design in open pit mines. *Computers & Operations Research*, 104739, 2-26. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2019.06.013>.



20. Alexandrov, V., Vasilyeva, M., & Koptev, V. (2019). Effective power and speed of mining dump trucks in fuel economy mode. Journal of Mining Institute, 239, 556-563. <https://doi.org/10.31897/pmi.2019.5.556>.
21. Soofastaei, A., Aminossadati, S.M., Kizil, M.S., & Knights, P. (2016). A discrete-event model to simulate the effect of truck bunching due to payload variance on cycle time, hauled mine materials and fuel consumption. International Journal of Mining Science and Technology, 26(5), 745-752. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2016.05.047>.
22. Darling, P. SME Mining Engineering Handbook. v.1. 3rd & #176; ed. Society for mining, Metallurgy, and Exploration. Print.
23. Ercelebi, S., & Bascetin, A. (2009). Optimization of shovel-truck system for surface mining. Journal Of The Southern African Institute Of Mining And Metallurgy, 109(7), 433-439. <http://www.scielo.org.za/pdf/jsaimm/v109n7/06.pdf>
24. Magna Tyres. (2022, 15 abril). Principales causas de daños en los neumáticos | Magna Tyres. <https://magnatyres.com/es/academia/causas-dano-neumaticos/>
25. Néstor, O. (2020). Condiciones de operación del camión Caterpillar 793D, para determinar el desgaste de neumáticos. [https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/60248/Silva\\_VNO-SD.pdf?sequence=1](https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/60248/Silva_VNO-SD.pdf?sequence=1)
26. Alvarado, Y. (2019). Sistema de gestión de mantenimiento para la durabilidad de los neumáticos OTR para camiones de acarreo en mina con soporte informático. Marcona 2018. Huánuco - Perú: Universidad Nacional Hermilio Valdizan, Facultad de Ingeniería Industrial y Sistemas, Escuela profesional de Ingeniería Industrial.
27. Blanco, J. R. (2016). Incremento de la vida útil de neumáticos para reducir costos de operación en camiones caterpillar 797F en Toromocho - Chinalco Perú. Huancayo - Perú: Universidad Nacional del Centro del Perú, Facultad de Ingeniería Mecánica.
28. Morales, J. I. (2020). Aumento de vida útil de los neumáticos para la flota de transporte de minera centinela. Santiago de Chile: Universidad de Chile, Facultad de ciencias físicas y matemáticas, Departamento de ingeniería de minas.
29. Kevin, J (2022). Propuesta metodológica para adaptar el manejo de residuos de neumáticos mineros a la ley REP. Repositorio Digital USM, UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA.





30. Laszirh, & Laszirh. (2024b, octubre 24). Desgaste de neumáticos OTR | Las Zirh, la solución efectiva. Laszirh | Protection Chain - Tire Protection Chains -. <https://laszirh.com/es/como-minimizar-el-desgaste-de-neumaticos-otr-en-escenarios-extremos/>
31. Laszirh, & Laszirh. (2024, 27 septiembre). Cadenas para Cargadores: Protege Llantas OTR en Minería. Laszirh | Protection Chain - Tire Protection Chains -. <https://laszirh.com/es/cadenas-para-cargadores-elemento-esencial-en-la-mineria/>
32. Admin-Revista. (2021, 10 diciembre). GESTIÓN DE NEUMÁTICOS MINEROS | Revista Minera Crisol. Revista Minera Crisol. <https://revistacrisol.cl/gestion-de-neumaticos-mineros/>
33. Equipo Minero. (n.d.). Manteniéndose en la cima de los neumáticos. Recuperado de <https://www.equipo-minero.com/contenidos/manteniendose-en-la-cima-de-los-neumaticos/>
34. Laszirh, Protection Chain - Tire Protection Chains. (2024a, enero 11). Innovación en Cadenas de Llantas OTR: Historia de Las Zirh. Laszirh | Protection Chain - Tire Protection Chains -. <https://laszirh.com/es/company-profile/>
35. Laszirh, Protection Chain - Tire Protection Chains. (2024, 11 enero). Innovación en Cadenas de Neumáticos: Historia de Las Zirh. Laszirh | Protection Chain-Tire Protection Chains -. <https://laszirh.com/es/history/>
36. Tunnicliffe, A. (2024, 26 septiembre). Treading carefully: industry looks to improve sustainability of mining tyres. Mining Technology. <https://www.mining-technology.com/features/treading-carefully-sustainability-mining-tyres/?cf-view&cf-closed>
37. Kunkyin-Saadaari, F., Gyebuni, R., & Asamoah-Danquah, C. (2024). Supervisor-Field Engineering Approach (S-FEA) of Determining Tyre Failures in the Haul Trucks at Newmont Ahafo Mine. Engineering And Applied Sciences, 9(3), 20-34. <https://doi.org/10.11648/j.eas.20240903.11>
38. Morales Navarro, J. (2020). Aumento de vida útil de los neumáticos para la flota de transporte de Minera Centinela. Disponible en <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/177975>



39. Pitcrew mining » Pitcrew AI. 2024. (s. f.). <https://pitcrew.ai/pitcrew-mining/>

40. Gutierrez, E. O. (2020). Implementación de un sistema TPMS y su impacto en la vida útil de neumáticos gigantes de camiones Caterpillar 793 en una empresa minera, 2020 (Tesis de licenciatura). Repositorio de la Universidad Privada del Norte. Recuperado de <https://hdl.handle.net/11537/24625>

41. CODELCO - Corporación Nacional del Cobre, Chile (2023). Gabriela Mistral. [https://www.codelco.com/operaciones/minera-gaby/gabriela-mistral?utm\\_source](https://www.codelco.com/operaciones/minera-gaby/gabriela-mistral?utm_source)

42. Riquelme, S., & Riquelme, S. (2024, 24 diciembre). División Gabriela Mistral de Codelco ingresa EIA para extender su vida útil hasta 2055. Guía Minera de Chile. [https://www.guiaminera.cl/division-gabriela-mistral-de-codelco-ingresa-eia-para-extender-su-vida-util-hasta-2055/?utm\\_source](https://www.guiaminera.cl/division-gabriela-mistral-de-codelco-ingresa-eia-para-extender-su-vida-util-hasta-2055/?utm_source)

43. Hossop, M. (2024, 26 febrero). ¿Qué nos dice el WACC? morpher.com. [https://www.morpher.com/es/blog/what-does-wacc-tell-us?utm\\_source](https://www.morpher.com/es/blog/what-does-wacc-tell-us?utm_source)



## 13. Anexo

Tabla 3. Causa - Costos con un valor de neumático aproximado de USD\$50.000

	Causa Críticas cambio de neumático	Cant. aproximada de neumáticos cambiados (mes)	Vida útil (hrs promedio)	Costos/hr	Costos bajos unidad neumático (59/80R63 Bridgestone)	Costos total neumático (59/80R64 Bridgestone)	Porcentaje	% Acum.
1	Mal trazado y mantenimiento de pistas	4	5500	\$ 9.09	\$ 50,000.00	\$ 200,000.00	23.53%	23.53%
2	Sobrecargas	3	5500	\$ 9.09	\$ 50,000.00	\$ 150,000.00	17.65%	41.18%
3	Condiciones climaticas adversas	3	5500	\$ 9.09	\$ 50,000.00	\$ 150,000.00	17.65%	58.82%
4	Velocidades excesivas	2	5500	\$ 9.09	\$ 50,000.00	\$ 100,000.00	11.76%	70.59%
5	Accidentes	2	5500	\$ 9.09	\$ 50,000.00	\$ 100,000.00	11.76%	82.35%
6	Conducción erróneas	1	5500	\$ 9.09	\$ 50,000.00	\$ 50,000.00	5.88%	88.24%
7	Alta/baja presión de inflado	1	5500	\$ 9.09	\$ 50,000.00	\$ 50,000.00	5.88%	94.12%
8	Mal mantenimiento mecánico	1	5500	\$ 9.09	\$ 50,000.00	\$ 50,000.00	5.88%	100.00%
	<b>Total</b>	<b>17</b>				<b>\$ 850,000.00</b>	<b>100.00%</b>	

Fuente: Creación propia

Tabla 4. Causa - Costo con un valor de neumáticos aproximado de USD\$75.000

	Causa Críticas cambio de neumático	Cant. aproximada de neumáticos cambiados (mes)	Vida útil (hrs promedio)	Costos/hr	Costos altos unidad neumático (59/80R63 Bridgestone)	Costos total neumático (59/80R64 Bridgestone)	Porcentaje	% Acum.
1	Mal trazado y mantenimiento de pistas	4	5500	\$ 13.64	\$ 75,000.00	\$ 300,000.00	23.53%	23.53%
2	Sobrecargas	3	5500	\$ 13.64	\$ 75,000.00	\$ 225,000.00	17.65%	41.18%
3	Condiciones climaticas adversas	3	5500	\$ 13.64	\$ 75,000.00	\$ 225,000.00	17.65%	58.82%
4	Velocidades excesivas	2	5500	\$ 13.64	\$ 75,000.00	\$ 150,000.00	11.76%	70.59%
5	Accidentes	2	5500	\$ 13.64	\$ 75,000.00	\$ 150,000.00	11.76%	82.35%
6	Conducción erróneas	1	5500	\$ 13.64	\$ 75,000.00	\$ 75,000.00	5.88%	88.24%
7	Alta/baja presión de inflado	1	5500	\$ 13.64	\$ 75,000.00	\$ 75,000.00	5.88%	94.12%
8	Mal mantenimiento mecánico	1	5500	\$ 13.64	\$ 75,000.00	\$ 75,000.00	5.88%	100.00%
	<b>Total</b>	<b>17</b>				<b>\$ 1,275,000.00</b>	<b>100.00%</b>	

Fuente: Creación propia

Tabla 10. Planificación de turnos y distribución de días laborales por cargo

Cargo Personal	Turno	L	M	W	J	V	S	D	L	M	W	J	V	S	D	L	M	W	J	V	S	D	L	M	W	J	V	S	D	L	M	W
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
Ingeniero de proyectos	5x2 4x3	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1
Topógrafo	5x2 4x3	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Especialista en redes y telecomunicaciones	5x2 4x3	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1
Administrador de contratos	5x2 4x3	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1
Supervisor de seguridad	5x2 4x3	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1
Operador de maquinaria pesada Pala	5x2 4x3	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1
Maestro de obra	5x2 4x3	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1
Ayudante de obra	5x2 4x3	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1
Supervisor de servicios 1	7x7	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Operario de terreno 1.1	7x7	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Operario de terreno 1.2	7x7	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Operario de terreno 1.3	7x7	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Técnico de mantenimiento 1.1	7x7	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Técnico en electrónica 1.1	7x7	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Supervisor de servicios 2	7x7	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0
Operario de terreno 2.1	7x7	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0
Operario de terreno 2.2	7x7	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0
Operario de terreno 2.3	7x7	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0
Técnico de mantenimiento 2.1	7x7	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0
Técnico en electrónica 2.1	7x7	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0

Fuente propia

Tabla 17. Costo variable unitario (Total) de la instalación de cámaras

	Camara	Excavación y preparación del suelo	Operario	Supervisor	Maestro	Ayudante maestro	Operador maquinaria	Combustible	Total
Instalación de camara	\$ 5.000	\$ 4,50	\$ 6,30	\$ 17,78	\$ 18,89	\$ 16,23	\$ 5,41	\$ 0,10	\$ 5.069
		0,045	1	4	3	3	1	1	
		m3	horas	horas	horas	horas	hora	horas trabajo	
		\$ 100,00						10	
								Litros por hora	

Fuente propia



Tabla 18. Costos variable unitario (Total) del servicio de monitoreo

	Respuestos de camara	Técnico de mantenimiento	Técnico en electrónica	Especialista en redes y telecomunicaciones	Supervisor	Luz (kWh)	Internet	Software de monitoreo	Total
Monitoreo equipo estandar	\$ 1.000,00	\$ 16,30	\$ 22,22	\$ 12,99	\$ 27,06	\$ 0,400	\$ 0,188	\$ 8,22	\$ 1.087,37
		2	2	2	8	8	4	4	
		horas	horas	horas	horas	kWh	Mbps (horas)	Costo (hora)	
						\$ 0,050	\$ 35,00	\$ 3.000,00	
						kWh	Mbps (mes)	Costo software anuales	
							744	744	
							\$ 0,05	\$ 8,22	
								\$ 2,1	

Fuente propia



Tabla 29. Evaluación económica caso normal

		6	9	11	13	15	18	22	27	33	40
	N° de Instalación de cámara										
	N° de Monitoreo										
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
+	Ingreso por venta activo					US\$ 592,50					US\$ 592,50
+	Ingresos (instalación de cámara)	US\$ 33.456,77	US\$ 50.185,16	US\$ 61.337,42	US\$ 72.489,67	US\$ 83.641,93	US\$ 100.370,32	US\$ 122.674,83	US\$ 150.555,48	US\$ 184.012,25	US\$ 223.045,15
+	Ingresos (Monitoreo)	US\$ 14.353,27	US\$ 16.745,49	US\$ 19.137,70	US\$ 22.726,02	US\$ 26.314,33	US\$ 31.098,76	US\$ 37.079,29	US\$ 44.255,92	US\$ 52.628,67	US\$ 63.393,62
-	Costos variables (Instalación de cámara)	(US\$ 30.415,25)	(US\$ 45.622,87)	(US\$ 55.761,29)	(US\$ 65.899,70)	(US\$ 76.038,12)	(US\$ 91.245,74)	(US\$ 111.522,58)	(US\$ 136.868,62)	(US\$ 167.283,86)	(US\$ 202.768,32)
-	Costos variables (Monitoreo)	(US\$ 13.048,43)	(US\$ 15.223,17)	(US\$ 17.397,91)	(US\$ 20.660,01)	(US\$ 23.922,12)	(US\$ 28.271,60)	(US\$ 33.708,44)	(US\$ 40.232,66)	(US\$ 47.844,24)	(US\$ 57.630,57)
-	Costos variables (Otros)	US\$ 0,00	(US\$ 836,42)	(US\$ 557,61)	(US\$ 557,61)	(US\$ 557,61)	(US\$ 836,42)	(US\$ 1.115,23)	(US\$ 1.394,03)	(US\$ 1.672,84)	(US\$ 1.951,65)
=	Margen bruto (ingreso - costo)	US\$ 30.443,23	US\$ 35.694,52	US\$ 41.554,12	US\$ 49.418,39	US\$ 57.875,15	US\$ 68.494,93	US\$ 81.939,99	US\$ 98.175,45	US\$ 117.201,30	US\$ 141.893,52
-	Gastos Fijos										
-	Administración	(US\$ 47.377,15)	(US\$ 47.377,15)	(US\$ 47.377,15)	(US\$ 47.377,15)	(US\$ 47.377,15)	(US\$ 47.377,15)	(US\$ 47.377,15)	(US\$ 47.377,15)	(US\$ 47.377,15)	(US\$ 47.377,15)
-	Comercialización		(US\$ 3.000,00)	(US\$ 3.000,00)	(US\$ 3.000,00)	(US\$ 3.000,00)	(US\$ 3.000,00)	(US\$ 3.000,00)	(US\$ 3.000,00)	(US\$ 3.000,00)	(US\$ 3.000,00)
-	Financieros	(US\$ 233,96)	(US\$ 149,68)	(US\$ 10,86)			(US\$ 233,96)	(US\$ 149,68)	(US\$ 10,86)		
-	Depreciación	(US\$ 671,50)	(US\$ 671,50)	(US\$ 671,50)	(US\$ 671,50)	(US\$ 671,50)	(US\$ 671,50)	(US\$ 671,50)	(US\$ 671,50)	(US\$ 671,50)	(US\$ 671,50)
=	Utilidad antes de impuesto	(US\$ 17.839,38)	(US\$ 15.503,80)	(US\$ 9.505,39)	(US\$ 1.630,26)	US\$ 6.826,51	US\$ 17.212,33	US\$ 30.741,67	US\$ 47.115,93	US\$ 66.152,65	US\$ 90.844,87
-	Impuesto 27%	US\$ 4.816,63	US\$ 4.186,03	US\$ 2.566,46	US\$ 440,17	(US\$ 1.843,16)	(US\$ 4.647,33)	(US\$ 8.300,25)	(US\$ 12.721,30)	(US\$ 17.861,22)	(US\$ 24.528,12)
=	Utilidad despues de impuesto	(US\$ 13.022,75)	(US\$ 11.317,78)	(US\$ 6.938,94)	(US\$ 1.190,09)	US\$ 4.983,35	US\$ 12.565,00	US\$ 22.441,42	US\$ 34.394,63	US\$ 48.291,43	US\$ 66.316,76
+	Depreciación	US\$ 671,50	US\$ 671,50	US\$ 671,50	US\$ 671,50	US\$ 671,50	US\$ 671,50	US\$ 671,50	US\$ 671,50	US\$ 671,50	US\$ 671,50
-	Amortización	(US\$ 702,35)	(US\$ 786,63)	(US\$ 881,02)			(US\$ 702,35)	(US\$ 786,63)	(US\$ 881,02)		
-	Valor de desecho										US\$ 0,00
-	Inversión	(US\$ 3.950,00)				(US\$ 3.950,00)					
-	Capital de trabajo	(US\$ 20.146,68)									US\$ 20.146,68
	Flujo Caja	(US\$ 24.096,68)	(US\$ 13.053,59)	(US\$ 11.432,90)	(US\$ 7.148,46)	(US\$ 518,59)	US\$ 1.704,85	US\$ 12.534,15	US\$ 22.326,29	US\$ 34.185,11	US\$ 48.962,93
	Tasa de Descuento	9,26%									
	VAN	US\$ 43.874,98									
	TIR	18%									

Fuente propia



Tabla 30. Evaluación económica escenario optimista

		10	12	15	18	22	27	33	41	51	63	
	N° de Instalación de cámara											
	N° de Monitoreo											
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
+	Ingreso por venta activo						US\$ 790,00					
+	Ingresos (instalación de cámara)	US\$ 55.761,29	US\$ 66.913,55	US\$ 83.641,93	US\$ 100.370,32	US\$ 122.674,83	US\$ 150.555,48	US\$ 184.012,25	US\$ 228.621,28	US\$ 284.382,57	US\$ 351.296,11	
+	Ingresos (Monitoreo)	US\$ 17.941,59	US\$ 22.726,02	US\$ 28.706,55	US\$ 35.883,18	US\$ 45.452,03	US\$ 57.413,09	US\$ 71.766,36	US\$ 90.904,06	US\$ 114.826,18	US\$ 144.728,84	
-	Costos variables (Instalación de cámara)	(US\$ 50.692,08)	(US\$ 60.830,50)	(US\$ 76.038,12)	(US\$ 91.245,74)	(US\$ 111.522,58)	(US\$ 136.868,62)	(US\$ 167.283,86)	(US\$ 207.837,53)	(US\$ 258.529,61)	(US\$ 319.360,10)	
-	Costos variables (Monitoreo)	(US\$ 16.310,54)	(US\$ 20.660,01)	(US\$ 26.096,86)	(US\$ 32.621,07)	(US\$ 41.320,03)	(US\$ 52.193,72)	(US\$ 65.242,15)	(US\$ 82.640,06)	(US\$ 104.387,44)	(US\$ 131.571,67)	
-	Costos variables (Otros)	US\$ 0,00	(US\$ 557,61)	(US\$ 836,42)	(US\$ 836,42)	(US\$ 1.115,23)	(US\$ 1.394,03)	(US\$ 1.672,84)	(US\$ 2.230,45)	(US\$ 2.788,06)	(US\$ 3.345,68)	
=	Margen bruto (ingreso - costo)	US\$ 39.321,34	US\$ 48.911,47	US\$ 61.570,80	US\$ 76.792,41	US\$ 97.599,09	US\$ 123.293,67	US\$ 153.736,90	US\$ 194.327,87	US\$ 245.066,58	US\$ 308.236,51	
-	Gastos Fijos											
-	Administración	(US\$ 47.377,15)	(US\$ 47.377,15)	(US\$ 47.377,15)	(US\$ 47.377,15)	(US\$ 47.377,15)	(US\$ 47.377,15)	(US\$ 47.377,15)	(US\$ 47.377,15)	(US\$ 47.377,15)	(US\$ 47.377,15)	
-	Comercialización	US\$ 0,00	(US\$ 3.000,00)	(US\$ 3.000,00)	(US\$ 3.000,00)	(US\$ 3.000,00)	(US\$ 3.000,00)	(US\$ 3.000,00)	(US\$ 3.000,00)	(US\$ 3.000,00)	(US\$ 3.000,00)	
-	Financieros	(US\$ 138,50)	(US\$ 1.007,01)	(US\$ 28.591,93)			(US\$ 138,50)	(US\$ 1.007,01)	(US\$ 28.591,93)			
-	Depreciación	(US\$ 526,67)	(US\$ 526,67)	(US\$ 526,67)	(US\$ 526,67)	(US\$ 526,67)	(US\$ 526,67)	(US\$ 526,67)	(US\$ 526,67)	(US\$ 526,67)	(US\$ 526,67)	
=	Utilidad antes de impuesto	(US\$ 8.720,98)	(US\$ 2.999,36)	(US\$ 17.924,94)	US\$ 25.888,60	US\$ 46.695,28	US\$ 72.251,36	US\$ 101.826,07	US\$ 114.832,13	US\$ 194.162,77	US\$ 257.332,70	
-	Impuesto 27%	US\$ 2.354,66	US\$ 809,83	US\$ 4.839,73	(US\$ 6.989,92)	(US\$ 12.607,72)	(US\$ 19.507,87)	(US\$ 27.493,04)	(US\$ 31.004,67)	(US\$ 52.423,95)	(US\$ 69.479,83)	
=	Utilidad despues de impuesto	(US\$ 6.366,31)	(US\$ 2.189,53)	(US\$ 13.085,21)	US\$ 18.898,68	US\$ 34.087,55	US\$ 52.743,49	US\$ 74.333,03	US\$ 83.827,45	US\$ 141.738,82	US\$ 187.852,87	
+	Depreciación	US\$ 526,67	US\$ 526,67	US\$ 526,67	US\$ 526,67	US\$ 526,67	US\$ 526,67	US\$ 526,67	US\$ 526,67	US\$ 526,67	US\$ 526,67	
-	Amortización	(US\$ 868,51)	(US\$ 920,62)	(US\$ 975,86)				(US\$ 868,51)	(US\$ 920,62)	(US\$ 975,86)		
	Valor de desecho										US\$ 0,00	
-	Inversión	(US\$ 3.950,00)					(US\$ 3.950,00)					
-	Capital de trabajo	(US\$ 20.146,68)									US\$ 20.146,68	
	Flujo Caja	(US\$ 24.096,68)	(US\$ 6.708,16)	(US\$ 2.583,49)	(US\$ 13.534,40)	US\$ 19.425,34	US\$ 34.614,22	US\$ 49.320,16	US\$ 73.991,19	US\$ 83.433,50	US\$ 141.289,63	US\$ 208.526,22
	Tasa de Descuento	4,57%										
	VAN	US\$ 377.425,08										
	TIR	45%										

Fuente propia



Tabla 31. Evaluación económica escenario pesimista

		6	9	11	13	15	20	22	22	22	22	
	N° de Instalación de cámara											
	N° de Monitoreo	12	13	15	17	19	22	25	29	33	38	
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
+	Ingreso por venta activo		US\$ 395,00		US\$ 395,00		US\$ 395,00		US\$ 395,00		US\$ 395,00	
+	Ingresos (instalación de cámara)	US\$ 33.456,77	US\$ 50.185,16	US\$ 61.337,42	US\$ 72.489,67	US\$ 83.641,93	US\$ 111.522,58	US\$ 122.674,83	US\$ 122.674,83	US\$ 122.674,83	US\$ 122.674,83	US\$ 122.674,83
+	Ingresos (Monitoreo)	US\$ 14.353,27	US\$ 15.549,38	US\$ 17.941,59	US\$ 20.333,80	US\$ 22.726,02	US\$ 26.314,33	US\$ 29.902,65	US\$ 34.687,08	US\$ 39.471,50	US\$ 45.452,03	US\$ 45.452,03
-	Costos variables (Instalación de cámara)	(US\$ 30.415,25)	(US\$ 45.622,87)	(US\$ 55.761,29)	(US\$ 65.899,70)	(US\$ 76.038,12)	(US\$ 101.384,16)	(US\$ 111.522,58)	(US\$ 111.522,58)	(US\$ 111.522,58)	(US\$ 111.522,58)	(US\$ 111.522,58)
-	Costos variables (Monitoreo)	(US\$ 13.048,43)	(US\$ 14.135,80)	(US\$ 16.310,54)	(US\$ 18.485,28)	(US\$ 20.660,01)	(US\$ 23.922,12)	(US\$ 27.184,23)	(US\$ 31.533,71)	(US\$ 35.883,18)	(US\$ 41.320,03)	(US\$ 41.320,03)
-	Costos variables (Otros)	US\$ 0,00	(US\$ 836,42)	(US\$ 557,61)	(US\$ 557,61)	(US\$ 557,61)	(US\$ 1.394,03)	(US\$ 557,61)	US\$ 0,00	US\$ 0,00	US\$ 0,00	US\$ 0,00
=	Margen bruto (ingreso - costo)	US\$ 30.443,23	US\$ 33.411,05	US\$ 39.270,64	US\$ 44.851,44	US\$ 50.827,23	US\$ 60.374,87	US\$ 68.239,14	US\$ 77.373,04	US\$ 86.506,94	US\$ 98.319,32	US\$ 98.319,32
-	Gastos Fijos											
-	Administración	(US\$ 47.377,15)	(US\$ 47.377,15)	(US\$ 47.377,15)	(US\$ 47.377,15)	(US\$ 47.377,15)	(US\$ 47.377,15)	(US\$ 47.377,15)	(US\$ 47.377,15)	(US\$ 47.377,15)	(US\$ 47.377,15)	(US\$ 47.377,15)
-	Comercialización	US\$ 0,00	(US\$ 3.000,00)	(US\$ 3.000,00)	(US\$ 3.000,00)	(US\$ 3.000,00)	(US\$ 3.000,00)	(US\$ 3.000,00)	(US\$ 3.000,00)	(US\$ 3.000,00)	(US\$ 3.000,00)	(US\$ 3.000,00)
-	Financieros	(US\$ 289,73)	(US\$ 110,19)				(US\$ 289,73)	(US\$ 110,19)				
-	Depreciación	(US\$ 1.777,50)	(US\$ 1.777,50)	(US\$ 1.777,50)	(US\$ 1.777,50)	(US\$ 1.777,50)	(US\$ 1.777,50)	(US\$ 1.777,50)	(US\$ 1.777,50)	(US\$ 1.777,50)	(US\$ 1.777,50)	(US\$ 1.777,50)
=	Utilidad antes de impuesto	(US\$ 19.001,15)	(US\$ 18.853,79)	(US\$ 12.884,00)	(US\$ 7.303,21)	(US\$ 1.327,42)	US\$ 7.930,49	US\$ 15.974,30	US\$ 25.218,39	US\$ 34.352,29	US\$ 46.164,67	US\$ 46.164,67
-	Impuesto 27%	US\$ 5.130,31	US\$ 5.090,52	US\$ 3.478,68	US\$ 1.971,87	US\$ 358,40	(US\$ 2.141,23)	(US\$ 4.313,06)	(US\$ 6.808,97)	(US\$ 9.275,12)	(US\$ 12.464,46)	(US\$ 12.464,46)
=	Utilidad despues de impuesto	(US\$ 13.870,84)	(US\$ 13.763,26)	(US\$ 9.405,32)	(US\$ 5.331,34)	(US\$ 969,02)	US\$ 5.789,26	US\$ 11.661,24	US\$ 18.409,43	US\$ 25.077,17	US\$ 33.700,21	US\$ 33.700,21
+	Depreciación	US\$ 1.777,50	US\$ 1.777,50	US\$ 1.777,50	US\$ 1.777,50	US\$ 1.777,50	US\$ 1.777,50	US\$ 1.777,50	US\$ 1.777,50	US\$ 1.777,50	US\$ 1.777,50	US\$ 1.777,50
-	Amortización	(US\$ 897,73)	(US\$ 1.077,27)	(US\$ 897,73)	(US\$ 1.077,27)	(US\$ 897,73)	(US\$ 1.077,27)	(US\$ 897,73)	(US\$ 1.077,27)	(US\$ 897,73)	(US\$ 1.077,27)	(US\$ 1.077,27)
	Valor de desecho											US\$ 0,00
-	Inversión	(US\$ 3.950,00)	(US\$ 3.950,00)	(US\$ 3.950,00)	(US\$ 3.950,00)	(US\$ 3.950,00)	(US\$ 3.950,00)	(US\$ 3.950,00)	(US\$ 3.950,00)	(US\$ 3.950,00)	(US\$ 3.950,00)	(US\$ 3.950,00)
-	Capital de trabajo	(US\$ 20.146,68)										US\$ 20.146,68
	Flujo Caja	(US\$ 24.096,68)	(US\$ 12.991,07)	(US\$ 17.013,04)	(US\$ 8.525,55)	(US\$ 8.581,12)	(US\$ 89,24)	US\$ 2.539,49	US\$ 12.541,02	US\$ 15.159,65	US\$ 25.956,95	US\$ 54.547,12
	Tasa de Descuento	14,80%										
	VAN	(US\$ 26.820,36)										
	TIR	6%										

Fuente propia