

Informe proyecto de titulación

Selección de elementos de desgaste en baldes de cargadores frontales para la minería

Ingeniería Civil Mecánica – Ingeniería Civil Industrial

Alumno: Oscar Herrera Bascuñán

Supervisor: Francisco King Soler

Profesor: Mauricio Campillo Canto

Tabla de contenido

| | |
|--|-----------|
| 1. Introducción | 5 |
| I. Contexto de la empresa | 5 |
| II. Contexto de la oportunidad | 5 |
| III. Medidas Cuantitativas y Cualitativas | 8 |
| 2. Objetivo Smart y específicos | 9 |
| 3. Estado del arte | 10 |
| I. Contexto de faenas | 10 |
| II. Desgaste abrasivo | 10 |
| III. Materiales y tratamientos | 11 |
| IV. Propiedades relevantes | 11 |
| V. Cargadores frontales | 12 |
| A. Cargador frontal | 12 |
| B. Elementos de desgaste en baldes | 12 |
| C. Elementos críticos | 14 |
| VI. Modelos de elementos de desgaste | 15 |
| A. Modelos de cargadores y excavadoras | 15 |
| B. Selección de calzas según acero consumible, penetración e impacto | 15 |
| VII. Granulometría del material y su impacto en el desgaste abrasivo | 16 |
| • Segmentación del desgaste | 17 |
| 4. Alternativas de soluciones y sus ventajas y desventajas | 18 |
| • Método de selección implementada | 18 |
| 5. Metodologías | 19 |
| 6. Matriz de riesgos y sus mitigaciones | 21 |
| 7. Medidas de desempeño | 22 |
| 8. Planificación | 23 |
| 9. Desarrollo | 24 |
| I. Propiedades de los equipos | 24 |
| II. Propiedades del material de extracción | 25 |
| III. Selección de candidatos | 27 |
| IV. Rendimiento de elementos de configuraciones seleccionadas | 28 |
| 10. Evaluación económica de configuraciones | 33 |
| 11. Resultados y recomendaciones | 35 |
| 12. Conclusiones y discusión | 37 |
| I. Desgaste abrasivo | 37 |
| II. Recomendaciones sobre la selección de elementos de desgaste | 37 |
| III. Sobre el cumplimiento del objetivo SMART y específicos | 37 |
| IV. Beneficios de utilizar el estudio | 38 |
| V. Recomendaciones para el futuro | 38 |
| 13. Referencias | 39 |
| 14. Anexos | 40 |

Resumen ejecutivo

La industria minera a menudo enfrenta la tarea de seleccionar elementos propensos al desgaste, un proceso crucial que comúnmente se resuelve consultando fabricantes y proveedores. Sin embargo, en el caso de elementos de desgaste que se enfrentan a un desgaste abrasivo, como es el caso de las faenas de Besalco Minería, su selección depende de las propiedades, forma, material y mineral al que se exponen.

Actualmente Besalco Minería incurre en costos adicionales por pruebas no fundamentadas y configuraciones de elementos de desgaste no adecuados. Por lo anterior, el proyecto “Selección de elementos de desgaste en baldes de cargadores frontales en la minería” buscó abordar de manera sistemática la configuración de componentes de desgaste en baldes de cargadores, según el escenario presente y elementos disponibles, donde el indicador clave es la reducción de un 15% del TCO (Costo total de propiedad) de las configuraciones de baldes.

Este proyecto se llevó a cabo en las faenas Gabriela Mistral, Centinela y Atacama Kozan, donde presta servicios Besalco Minería, en un plazo de 3 meses, abordando riesgos de disponibilidad, accesibilidad a la información y fallas por operación, junto a sus respectivas mitigaciones. Se inició el 1 de agosto de 2023, y su planificación abordó el desarrollo de un modelo de selección de elementos de desgaste, evaluación económica de las configuraciones y concluyó con la documentación de los resultados, variables claves y hallazgos, finalizando con las recomendaciones para una correcta selección de componentes y futuras mejoras para mejorar el modelo y habilitarlo a otros sistemas de desgaste.

Abstract

The mining industry often faces the task of selecting items prone to wear, a crucial process commonly resolved by consulting manufacturers and suppliers. However, in the case of wear elements facing abrasive wear, as is the situation at Besalco Minería sites, their selection depends on properties, shape, material, and the mineral to which they are exposed. Currently, Besalco Minería incurs additional costs due to unsubstantiated tests and inappropriate wear element configurations.

Therefore, the project "Selection of Wear Elements in Front Loader Buckets in Mining" aims systematically the correct configuration of wear components in loader buckets, considering the present scenario and available elements, with the key indicator being a 15% reduction in the cost/duration of bucket configurations.

This project was carried out at the Gabriela Mistral, Centinela, and Atacama Kozan mining sites, where Besalco Minería provides services, within a timeframe of 3 months. The project addressed risks related to availability, information accessibility, and operation failures, along with their respective mitigations. It commenced on August 1, 2023, and its planning encompassed the development of a wear elements selection model, economic evaluation of configurations, and concluded with the documentation of results, key variables, and findings. The project ended with recommendations for the proper selection of components and future improvements to enhance the model and make it compatible with other wear systems.

I. Introducción

I. Contexto de la Empresa

Besalco S.A. es una compañía chilena fundada en 1944 como una empresa constructora especializada en obras civiles y vialidad. Actualmente se compone de 8 unidades de negocios con ventas netas de 700.000 millones de pesos anuales y un total de 11.600 trabajadores activos. Dentro de las unidades de negocios se encuentra Besalco Maquinarias, dedicada a la prestación de servicios a la Industria Minera, Construcción y la industria Forestal, alcanzando ventas netas de 217.000 millones de pesos anuales. Por otra parte, Besalco Maquinarias incluye las empresas Besalco Arriendo y Besalco Minería. Esta última se enfoca en la prestación de servicios integrales para la explotación minera y chancado, incluyendo carguío y transporte, mantenimiento de equipos propios y otras actividades afines a la industria minera, participando actualmente en 13 faenas mineras en Chile.

II. Contexto de Oportunidad

En las 13 faenas en Chile en las que Besalco Minería mantiene servicio, se incluyen a más de 800 equipos pesados para apoyar el proceso de extracción y transporte de productos de la cadena de producción en mineras de extracción metálica y no metálica. El parque de equipos se divide en 4 grupos según su función: bulldozer/wheeldozer, camiones, cargadores frontales y equipos de apoyo. Dentro de cada funcionalidad, los equipos se agrupan según su modelo, lo que permite englobar los costos operativos y el mantenimiento de los equipos, relativos a su funcionalidad, modelo y componentes. Dichos componentes se catalogan en: elementos mecánicos, elementos eléctricos y elementos de desgaste. Los elementos de desgaste son componentes que comparten todos los equipos que trabajan en la extracción minera y corresponden a elementos que se someten a contacto directo con el mineral durante su extracción, sufriendo desgaste inevitable y progresivo en el tiempo, producto de la exposición de cargas y esfuerzos durante la operación de los equipos (ver Figura 1).



Figura 1: Estado inicial y final de calzas Komatsu P025BDL utilizadas para la extracción de material tronado en mina Atacama Kozan (Fuente: elaboración propia).

Los elementos de desgaste se diseñan y seleccionan según el rendimiento del equipo, protección de componentes críticos y vida útil. Consecuentemente, el uso de elementos inadecuados genera mayores costos operativos, logísticos y mantenimiento y un desgaste prematuro. Por lo cual, se torna relevante la selección de elementos adecuados, con el fin de no incurrir en pérdidas innecesarias. Tomando en cuenta este contexto, en Besalco Minería existen cuatro sistemas críticos que utilizan elementos de desgaste: Rodados, Neumáticos, Baldes y Palas (ver Figura 2).

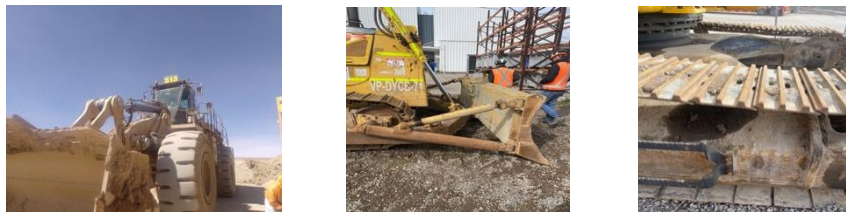


Figura 2: Sistemas de baldes, ruedas, palas y rodados de diferentes equipos (Fuente: elaboración propia).

Actualmente Besalco Minería mantiene en operación múltiples equipos con los sistemas antes mencionados, no existiendo un estudio de los factores que inciden en el rendimiento de sus componentes, seleccionando e implementando basados en prueba-error, sin mayor fundamentación teórica. Lo anterior, se evidencia en la faena Atacama Kozan, donde se probaron tres tipos de calzas distintas en tres cargadores frontales (Volvo, modelo L150h), los cuales trabajaron en el mismo frente (figura 1). Estos elementos de desgaste, de dureza similar, se probaron con el fin de encontrar el elemento con menor precio-duración, obteniendo los siguientes resultados (tabla 1):

| Equipo | Nombre | Costo Elemento | Duración promedio | Costo/hrs |
|---------|--------------------------|----------------|-------------------|-----------|
| CF-5788 | CAT alternativo 1U3352PT | \$232.632 | 500 | \$465 |
| CF-5789 | KOT P025BDL | \$800.000 | 250 | \$3.200 |
| CF-5790 | 30AMRL VOE-11417136 | \$1.010.000 | 400 | \$2.525 |

Tabla 1: Resultados de Costo-Duración de calzas (dientes) empleadas en cargadores frontales Volvo L150h (Fuente: elaboración propia).

Los resultados indican que el mejor elemento de desgaste son las calzas CAT 1U3352PT, por presentar la mejor relación Precio-Duración, estableciéndose como el elemento más eficiente del lote y recomendable para utilizar en el futuro. Sin embargo, nace la interrogante sobre las razones del alto rendimiento, ¿cómo un elemento más barato tiene tanta duración?, ¿es por su peso?, ¿es por su forma?, ¿es por su material?, son interrogantes que se centran en los factores de duración, en la posibilidad de evitar gastos adicionales en componentes de prueba y la existencia de modelos más adecuados, considerando que el mercado ofrece una alta gama de alternativas de elementos de desgaste con distintas aleaciones, tratamientos, formas y tamaños. Lo anterior, da paso a la pregunta más importante: ***¿es este elemento de desgaste el más eficiente disponible en el mercado?*** Esta pregunta muestra una brecha entre los elementos de desgaste utilizados actualmente por Besalco Minería y los elementos de desgaste más eficientes disponibles en el mercado. ***Por tanto, se vislumbra la oportunidad de efectuar un análisis que permita corregir las pérdidas de eficiencia, por no utilizar los elementos de desgaste adecuados.***

La información respecto a los elementos de desgaste, como también su duración y sus costos, ayudan a disminuir la incertidumbre respecto a la fijación de las tarifas según la faena, por ejemplo, pesos por tonelada transportada. La información ayuda a establecer la tarifa correcta para obtener utilidades y con ello cumplir con los objetivos de la gerencia de Besalco Minería y ofrecer mejores ofertas a nuevos y actuales clientes. Por lo que, una disminución informada de los costos de elementos de desgaste significa aumentar la holgura de la tarifa, obteniendo mayores utilidades u ofrecer precios más competitivos a los clientes, lo cual es importante, ya que aumenta la oportunidad de adjudicarse nuevos contratos.

Besalco Minería tiene como requerimiento para este proyecto un 15% de reducción del TCO de los actuales elementos de desgaste seleccionados, considerando el costo de cambio de configuración. Si la configuración seleccionada no requiere cambio de elementos duraderos, no se considera este requerimiento.

III. **Medidas Cuantitativas y Cualitativas:**

Por la magnitud de equipos englobadas por la oportunidad y el tiempo considerado para este proyecto, solo se consideró el sistema de baldes de los cargadores frontales de las faenas Gabriela Mistral (GM), Atacama Kozan (ATK) y Minera Centinela (MC). Dado lo anterior, se definió las medidas cuantitativas y cualitativas del proyecto.

Sobre las **Medidas Cuantitativas** que miden la magnitud de la oportunidad, se destacan todos los factores cuantitativos para la selección de elementos de desgaste, costos operativos, costos de logística, costos de rendimiento, duración, etc.

En cuanto a las **Medidas cualitativas** de la oportunidad, se refiere a todo el conocimiento para seleccionar elementos de desgaste en baldes de cargadores frontales, según las condiciones de los equipos y los componentes disponibles en el mercado.

2. Objetivos

I. Objetivo General (SMART):

Analizar propiedades y procesos de componentes críticos, con el fin de mejorar el rendimiento de elementos de desgaste en baldes de cargadores frontales de las faenas GM, MC y ATK, para reducir un 15% el TCO, en un plazo de 3 meses.

II. Objetivos específicos:

1. Estudiar los elementos de desgaste críticos y mecanismos de desgaste en baldes de cargadores frontales.
2. Desarrollar un modelo de selección de elementos de desgaste, a través de un estudio de los factores que inciden en su rendimiento.
3. Evaluar económicamente las configuraciones de baldes, considerando costos de componentes, costos operacionales y logísticos.
4. Recomendar elementos de desgaste disponibles y la entrega de la documentación de los resultados finales del proyecto.

3. Estado del Arte

I. Contexto de las faenas:

Las faenas de GM, ATK y MC se especializan en la extracción de cobre en forma de óxidos y sulfuros, cuya dureza del mineral varía entre 3-6 en escala Mohs. En cada una de las faenas operan dos cargadores y uno de reserva del mismo modelo, sin embargo, las marcas entre las faenas son distintas; GM opera con Caterpillar 992K, ATK con Volvo L150h y MC con Komatsu WA-900-8R. En las tres faenas los cargadores extraen materiales en el ciclo de extracción del cobre; en GM ripio y lastre, en MC ripio y en ATK material dinamitado. Este contexto será referenciado en el Estado del Arte y se encuentra en el anexo A0.

II. Desgaste abrasivo:

La definición del desgaste abrasivo según la ASTM G40-92 es: **“Pérdida de masa resultante de la interacción entre partículas o asperezas duras que son forzadas contra una superficie y se mueven a lo largo de ella, provocando daños superficiales intensos y con ello la destrucción total o parcial de la pieza”**. Por lo anterior, el desgaste aumenta en la medida que exista una mayor diferencia de dureza entre las superficies, provocando una mayor posibilidad de desprendimiento.

El desgaste abrasivo se cataloga en dos cuerpos y tres cuerpos; el primero se produce cuando las partículas abrasivas están unidas a una superficie que se desliza sobre otra, removiendo material y la otra ocurre cuando las partículas abrasivas pueden rodar libremente por el material (Caicedo, 2005), diferencia que se aprecia en la figura 3:



Figura 3: Muestra desgaste abrasivo a dos cuerpos y a tres cuerpos (Fuente: elaboración propia).

El mecanismo de desgaste abrasivo a tres cuerpos más efectivo es el corte. Ciertas propiedades de los materiales atenúan la eficiencia de este mecanismo. Cuando esto ocurre, el más eficiente se denomina micro-surcado, donde la remoción de material se presenta por acciones de

esfuerzo repetitivas, dando lugar, a un desgaste por fatiga con bajos ciclos de acción. La capacidad de atenuar el mecanismo de corte es fundamental para la resistencia al desgaste abrasivo a tres cuerpos (Caicedo, 2005). Se destaca que las partículas redondeadas en un método de atenuación del mecanismo de corte que disminuye según la irregularidad de las partículas abrasivas.

III. Materiales utilizados para el desgaste abrasivo en baldes:

Los aceros resistentes a la abrasión empleados en la industria minera para componentes sujetos a desgaste abrasivo son aleaciones de bajo contenido de carbono, con presencia de elementos de aleación en baja concentración (Silicio, Manganeso, Molibdeno, Cromo, entre los principales). A estos compuestos se les somete a procesos de temple y revenido, con el fin de mejorar sus propiedades mecánicas, al generar una microestructura de Martensita revenida (Guzmán, 2022). El material resultante es valorado por su elevada dureza, resistencia al desgaste, resistencia a la corrosión y tenacidad. Un ejemplo representativo es la plancha T-500, un material bajo en carbono tratado con temple y revenido, utilizado para de placas de blindaje en la estructura de los baldes (más información en anexo A1).

| Composición química T-500 | |
|---------------------------|---------------|
| C 0.22-0.30% | Si 0.50-0.70% |
| Mn 1.00-1.40% | Mo 0.30-0.50% |
| Ni 0.70-0.8% | Cr 1.00-1.30% |

Tabla 2: Composición Química del Acero T-500, baja en carbono y con elementos de aleación como el molibdeno, silicio, níquel y en mayor proporción cromo y manganeso (Fuente: elaboración propia).

IV. Propiedades relevantes para la resistencia al desgaste abrasivo:

Como la resistencia al desgaste abrasivo no es una propiedad inherente del material (Guzmán, 2022), comúnmente se asocia la dureza Brinell para su medición. Por lo que, usualmente se usa esta propiedad para comparar elementos de desgaste. Sin embargo, está demostrado por distintos estudios que la resistencia al desgaste abrasivo puede tener altos rangos de variación entre elementos de dureza similar (Gutiérrez, 2004). Por esto, se introduce la tenacidad a la fractura medida por el valor impacto Charpy, como propiedad adicional para la selección de componentes. Se destaca que estos valores son fácilmente entregados por los fabricantes, a diferencia de la fórmula y tratamiento térmico de los materiales, que se mantienen confidenciales para evitar imitaciones.

V. Cargador frontal y sus elementos de desgaste en baldes:

A. Cargador frontal:

Los cargadores frontales se utilizan para labores de carguío y levantamiento de materiales en los campos de la minería. Se encuentran en diferentes marcas, tamaño, potencia y capacidad de carga. Asociado a sus componentes, el cargador frontal se compone de varias partes que se agrupan en subsistemas (ver fig.4).

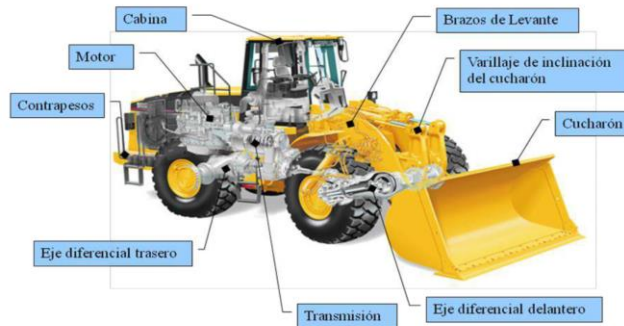


Figura 4: Esquema de componentes principales del cargador frontal (Flores Mejía, 2021).

B. Elementos de desgaste en baldes/cucharones de cargadores frontales en la industria:

Existen varios tipos de configuraciones de baldes de cargador frontal que difieren principalmente en los elementos de desgaste instalados, los cuales pueden ser apernados o soldados al labio de ataque, existiendo 3 tipos de configuraciones frecuentes:

- Configuración de labio punta espada

Configuración básica de un cargador que consiste en utilizar el labio de ataque como herramienta de corte directo, no es recomendable utilizarlo para labores extracción de mineral (Figura 5).

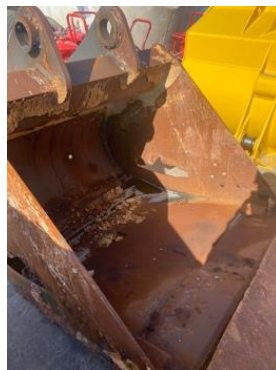


Figura 5: Balde con labio punta espada (Fuente: elaboración propia).

- Configuración de labio dentado:

Configuración que consiste en un labio de ataque que utiliza dientes como herramienta de corte, unidos al balde por medio de porta calzas apernadas o soldadas al labio (Figura 6).

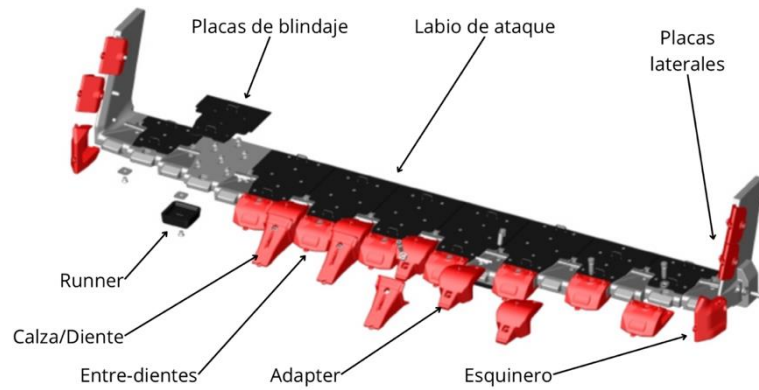


Figura 6: Elementos de desgaste de un balde de labio dentado (Fuente: elaboración propia).

- Configuración de labio con cuchillas segmentadas:

Configuración que consiste en utilizar cuchillas segmentadas apernadas en la zona inferior del labio de ataque, sobresaliendo del mismo para servir de herramienta de corte. Esta configuración cumple la función de cargar material y proteger al labio por medio de elementos originales o placas de blindaje (figura 29, anexo A8).

Esta configuración puede tener diferentes variantes, según el elemento de desgaste que se utiliza como elemento de corte (cuchilla de Bulldozer de la figura 29 o los entre dientes utilizados en la figura 30 de la sección de Configuraciones en anexo A8).

C. Elementos de desgaste críticos en baldes de cargadores frontales

El estudio de los elementos de desgaste que sufren desgaste abrasivo a tres cuerpos es escaso, sin embargo, existe una investigación llamada **“Análisis del desgaste en componentes de cargadores frontales, mediante modelos basados en elementos finitos” (Fuentes, 2018)**. Esta muestra los patrones de desgaste y criticidad de los elementos de desgaste de baldes de cargadores frontales (descrito en el anexo A2), en el cual se destaca que la zona de mayor esfuerzo de la estructura de un balde es el labio de ataque, focalizado en su centro (Figura 7).

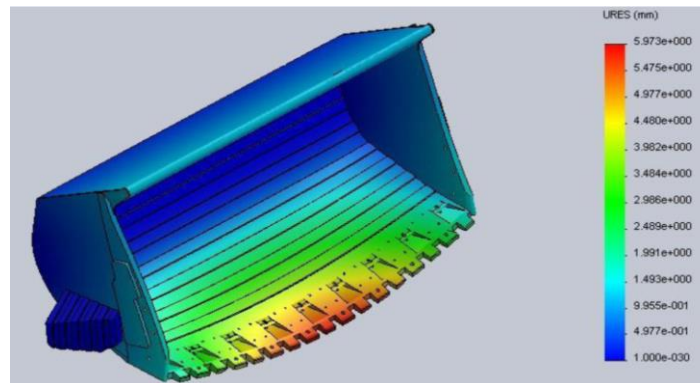


Figura 7: Diagrama de esfuerzo de Von Mises de un balde solo con labio de ataque (Fuentes, 2018).

Lo anterior, indica que los elementos de desgaste más críticos del balde son los que se encuentran en la zona frontal central, estos son:

- Herramienta de corte (Calzas o Cuchillas)
- Adapter
- Entre dientes
- Labio de ataque
- Placas de blindaje

Se destaca que los elementos críticos del balde dependerán de su configuración.

VI. Modelos de elementos de desgaste

En el mercado de elementos de desgaste para baldes, las marcas Komatsu y Caterpillar lideran la investigación de materiales y modelos, encontrándose una enorme variedad de modelos catalogados por serie, por compatibilidad y forma por función. Los proveedores originales suelen utilizar estas investigaciones protegidas por patentes, las que se liberan después de 20 años. Por lo anterior, los proveedores alternativos ofrecen modelos desactualizados y más baratos, a menos que tengan convenios con empresas líderes.

A. Modelo de calzas para cargadores frontales y excavadoras:

En el mercado de las calzas existen modelos para cargadores frontales y para excavadoras, pero pueden ser usados por ambos. Esta diferencia radica en la simetría del elemento, siendo simétrica en excavadoras para una penetración uniforme (Figura 31, anexo A9) y con mayor material inferior para cargadores para un desgaste focalizado en la cara inferior (Figura 32, anexo A9). Por lo anterior, es importante no utilizar calzas de excavadora en cargadores, a menos que requiera una penetración elevada a costa de una corta duración.

B. Selección de modelos de calzas según acero consumible, penetración e impacto:

En las faenas estudiadas se extrae mineral de cobre, el que muestra una gran afinidad con el azufre y es uno de los componentes más típicos de las minas de sulfuro (pirita, calcopirita); se presenta también como óxidos (cuprita) y como carbonatos (malaquita), según Servicio Nacional de Geología y Minería de Chile, 2019. Al evaluar la dureza de los materiales antes mencionados, se identifica que las minas de cobre en Chile tienen un valor promedio que varía entre 3 a 6 Mohs, lo suficiente para rayar el acero, generando desgaste impacto/abrasivo. Por lo anterior, los elementos que se utilizan para el transporte y carguío en las faenas de este estudio se exponen a impactos de cuerpos rocosos y abrasión.

Para cada escenario se selecciona un modelo de calza según la penetración y el material de desgaste requerido, según la dureza y granulometría del mineral. Por ejemplo, en la extracción de cobre se trabaja con mineral duro que requiere de material de desgaste alto, pero este debe ser menor según la penetración requerida, por tanto, las calzas se catalogan por su resistencia al desgaste abrasivo, resistencia a impactos y capacidad de penetración, según catálogos de Caterpillar

y Komatsu (Figura 17, Anexo A3) o la serie J de Caterpillar (Figura 18 y 19, anexo A3). Estos últimos son modelos de 15 años de antigüedad y son comunes entre los proveedores alternativos. Por lo anterior, se generó una tabla de aplicaciones de los diferentes modelos de calzas en el anexo A4.

VII. Granulometría del material y su impacto en el desgaste abrasivo:

La granulometría define la distribución del tamaño de partículas de un material, revelando información sobre el tipo de desgaste abrasivo del mineral. Granulometrías bajas aumentan la superficie de contacto y la cantidad de partículas abrasivas que desgastan la pieza de manera uniforme, por otro lado, granulometrías altas generan un desgaste abrasivo por impacto que desprende mayor material por partícula, pero en menor cantidad y una superficie de contacto localizada. Esto permite utilizar piezas con mayor penetración diseñadas para el desgaste de partículas grandes, focalizando material en zonas de alto impacto y piezas con menor penetración para partículas pequeñas, lo que permiten utilizar mayor material consumible para un desgaste uniforme en la superficie. Por lo anterior, esta propiedad define la penetración y el acero consumible.

Esta propiedad se puede estimar según los procesos del material, por ejemplo, en el chancado y molienda del material". Se genera con el propósito de obtener una granulometría adecuada para los diferentes tipos de lixiviación. "Para lixiviación en pilas, el mineral se reduce a tamaños entre 10 y 25 mm, para lixiviación en depósitos o tranques, entre 5 y 10mm y para lixiviación dinámica, chancado y molienda a tamaños inferiores a 1mm" (Codelco Educa, 2019). Sin embargo, antes del chancado el tamaño de las partículas del material tronado varían entre fragmentos de menos de 1 milímetro y mayores a 1 metro de diámetro, este rango puede ser más acotado dependiendo de la calidad de la tronadura, pero no dejará de ser un rango elevado. Además, un proceso de molienda genera partículas más redondas que producen un desgaste más uniforme, en lugar de partículas más irregulares; por ello el material más abrasivo es la arena no procesada.

A. Segmentación del desgaste:

Se requiere segmentar el rango de granulometría del material para determinar la penetración y el material de desgaste requerido. Este rango será segmentado según los procesos del material y una inspección visual del desgaste, tomando el valor de 1 para desgaste abrasivo, 2 para el punto intermedio y 3 para desgaste por impacto. Esta segmentación se resume en la siguiente tabla y estará completa en el anexo A5.

| Tipo de desgaste | Patrón de desgaste | Granulometría | Recomendaciones | Factor |
|----------------------|--|---------------|--|---|
| Abrasivo | -Desgaste uniformes. -Aspecto de pieza pulida. | [1, 25]mm | -Calzas con material de desgaste máximo. -Baja penetración requerida. | [0, 1] - Factor 0: arena - Factor 1: ripio para pilas de lixiviación. |
| Abrasivo- Impacto | -Desgaste uniformes sumado a cortes y piquetes que se denotan del resto en las zonas de mayor impacto. | [25, 1000]mm | -Medio material de desgaste. -Se requiere herramienta de corte con penetración media. | [1, 2] -Factor 2: material tronado en minas subterráneas. |
| Impacto | -Cortes no uniformes y profundos, en las zonas de mayor impacto. | [>1000]mm | -Se requiere herramienta de corte con penetración máxima. | [2, 3] - factor 3: material poco común en minería. |

Tabla 3: Segmentación de granulometría (Fuente: elaboración propia).

Toda la información recolectada en esta sección será utilizada para generar un modelo de selección de elementos de desgaste, descrita en la sección 6 de Metodologías.

4. Alternativas de soluciones y sus ventajas y desventajas

Dentro del modelo de selección a desarrollar, se debe implementar un proceso de selección de candidatos y posterior descarte, cuyas alternativas se muestran en la siguiente matriz, destacando sus ventajas y desventajas.

| N° | Alternativas de selección | Descripción | Ventajas | Desventajas |
|----|---|---|--|---|
| 1 | Prueba/Error | -Consiste en probar múltiples configuraciones por Dureza o Costo similar y seleccionar candidatos con menor Costo/Duración. | -No requiere elevada información. -Es una prueba rápida. -Mejor candidato dentro de un grupo de elementos. | -No asegura encontrar el más eficiente. -Incurrir en gastos adicionales por instalación de elementos que limitan la selección de modelos. |
| 2 | Proceso iterativo de selección, Prueba, Rectificar | -Solución iterativa que selecciona el mejor candidato teórico y evalúa su rendimiento a través de pruebas piloto y finalmente rectifica. | -Posibilidad de encontrar el más eficiente en un par de iteraciones. -No incurre en costos adicionales. | -Requiere de información precisa. -Requiere de un seguimiento continuo. -Requiere de disponibilidad de elementos seleccionados. |
| 3 | Selección por modelos de simulación de rendimiento. | -Busca simular el rendimiento de varios candidatos, a través de un modelo de simulación. -Requiere de un historial de elementos de desgaste. | -Permite evaluar el rendimiento de elementos de desgaste sin la necesidad de pruebas. | -Requiere de datos históricos y bien fundamentados. -Entre más relaciones tengan los elementos del historial, mejor será la predicción, pero menor será el alcance del modelo. |
| 4 | Elementos originales por modelo | -Consiste en seleccionar el modelo por tipo de desgaste y luego seleccionar el elemento original del equipo. | -Mejor Material garantizado. -Elementos de desgaste más modernos. -Mayor duración y calidad. | -Precios muy elevados. -A pesar de la larga duración, el Costo/Duración podría ser muy alto. |
| 5 | Elementos más baratos | -Consiste en seleccionar las calzas de menor costo. | -Menor precio. -Se pueden comprar en lotes, por su bajo precio. | -A pesar de su bajo precio, su duración podría generar un Costo/Duración elevado. |

Tabla 4: Matriz de alternativas de medición de rendimiento (Fuente: elaboración propia).

- **Método de selección Implementada:**

Dentro de los métodos de selección indicadas en el punto 4, se descartó la alternativa de solución 1, por presentar costos adicionales y las alternativas de solución 4 y 5, por que la alta duración de elementos originales versus su alto costo o el costo de elementos más baratos en comparación con su baja duración, no son suficientes para alcanzar una relación Costo/Duración aceptable.

Inicialmente se había seleccionado la alternativa 2, ya que se disponía de información suficiente para implementarla, sin embargo, se debió implementar la alternativa de solución **3 (plan de respaldo)**, dado que el lead time de los elementos de desgaste considerados para las pruebas de la alternativa de solución 2 es posterior al plazo de este proyecto.

5. Metodologías

Se debe aclarar que este proyecto servirá para optar al título de Ingeniería Civil Mecánica e Ingeniería Civil Industrial.

Para generar una metodología general de selección de elementos de desgaste se consideraron:

- A. Ciclo de mejora continua (PDCA): Análisis de escenarios y rectificación.
- B. Mapas de selección de materiales de Ashby (MSMA): Métodos de selección que pueden vincularse a materiales y componentes.
- C. Análisis jerárquico de procesos (AHP): Ayudará a desglosar procesos complejos en partes más manejables y jerárquicas de la empresa para diferentes fines, como, por ejemplo, obtener los costos de la evaluación económica.

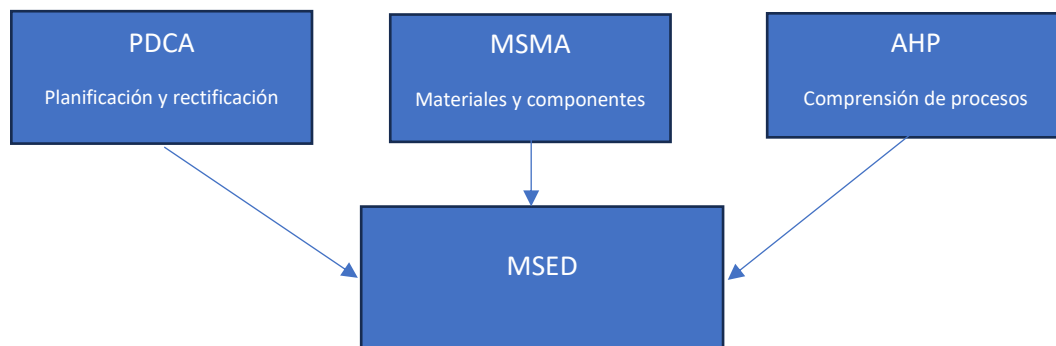


Figura 8: Diagrama de metodología de selección de elementos de desgaste (Fuente: elaboración propia).

- D. Metodología de selección de elementos de desgaste (MSED): Con todo lo anterior, se muestra la metodología que se utilizará en este proyecto:

- I. Propiedades del equipo:
 - a. Talla
 - b. Holgura de peso de elevación
 - c. Elementos actuales
- II. Propiedades del material de extracción:
 - a. Procesos del material
 - b. Dureza
 - c. Granulometría
- III. Selección de candidatos:

- a. Inspección de catálogos
- b. Selección de modelos según penetración requerida
- c. Definición de configuraciones candidatas y casos base
- IV. Rendimiento de elementos de configuraciones seleccionadas:
 - a. Cálculo de duración mediante modelos de simulación, historial o métodos alternativos
 - b. Identificar elementos compartidos entre configuraciones
- V. Evaluación económica:
 - a. Cálculo de costo/duración de elementos de configuraciones
 - b. Cálculo TCO de configuraciones
 - c. Cálculo ROI de configuraciones
- VI. Recomendaciones
 - a. Comparación TCO/ROI de candidatos
 - b. Candidatos seleccionados
 - c. Observaciones
- VII. Implementación
 - a. Instalación de configuraciones
 - b. Plan de mantenimiento de configuraciones
 - c. Plan de abastecimiento de configuraciones

Con la metodología actual se abarcan todos los objetivos específicos que dan lugar al objetivo general.

6. Matriz de riesgos y sus mitigaciones

Para asegurar una adecuada implementación de la solución, se generó la siguiente matriz de riesgo, con el fin de tener en cuenta los riesgos del proyecto, los cuales se catalogan según el impacto en baja-media-alta, según cómo afectaría la planificación de las actividades del proyecto, y una posibilidad de ocurrencia catalogada en baja-media-alta:

| Riesgos | Impacto/ Posibilidad | Descripción | Mitigaciones |
|--|-------------------------|--|---|
| Elementos de configuraciones seleccionadas sin stock disponibles. | Alto/Medio | El impacto de este riesgo es alto, ya que incide directamente en las pruebas de candidatos. | 1.- Probar modelos con menor penetración o resistencia a la abrasión. 2.- Utilizar Plan de respaldo: usar Alternativa de Selección 3 3.- Rectificar cuando se encuentren los elementos en stock. |
| Información técnica con retrasos o no disponible. | Medio/Medio | Este riesgo considera la posibilidad de no contar con información precisa para la selección de elementos. | 1.- Buscar información bibliográfica sobre valores estándar. 2.- Comunicación efectiva con proveedores y Stakeholders. |
| Detención del equipo por fractura de elementos críticos y de desgaste. | Alto/Medio | Este riesgo abarca la posibilidad de falla de un elemento crítico o elemento de desgaste en las pruebas piloto, por falta de procedimientos. | 1.- Aplicar un plan de mantenimiento. 2.- Aplicar un plan de operación. 3.- Capacitación de mantenimiento. |

Tabla 5: Matriz de riesgos y mitigaciones (Fuente: elaboración propia).

7. Medidas de desempeño

1. **Duración Promedio (Horas de operación):** Se utiliza para medir la duración promedio de elementos de desgaste.

$$\text{Duración Promedio} = \frac{\sum_0^N \text{Duración de elemento probado}}{\text{Numero total de elementos probados}}$$

2. **Costo/Duración (Pesos/Horas de operación):** Mide la eficiencia de uno o varios elementos de desgaste en cuanto a su costo y duración.

$$\text{Costo/Duración} = \frac{\text{Costo Promedio}}{\text{Duración Promedio}}$$

3. **Costo total de propiedad (TCO):** Considera todos los costos relacionados a una configuración que, medido en horas, permite la selección de configuraciones de balde considerando sus costos a lo largo de su vida útil.

$$\text{TCO} = \text{Costo Adquisición} + \text{Costo Operación} + \text{Costo Mantenimiento} \\ + \text{Otros Costos asociados}$$

4. **Beneficio de ahorro (BAH):** Mide la eficiencia de una configuración al comparar los beneficios con los costos iniciales.

$$\text{BAH} = \left(\frac{\text{Ahorro en costos}}{\text{Costo de configuración inicial}} \right) * 100$$

El TCO es la medida de desempeño que indica si una configuración logra cumplir con el objetivo general (**Reducción de un 15%**) en relación con la inicial, los otros indicadores sirven para obtener el TCO o para comparar magnitudes de este de manera más notoria, como el BAH que presenta la variación en forma de porcentaje entre dos configuraciones.

8. Planificación

La planificación del proyecto considera 13 actividades según cada uno de los 4 objetivos específicos definidos, según se muestra en la siguiente hoja de ruta:

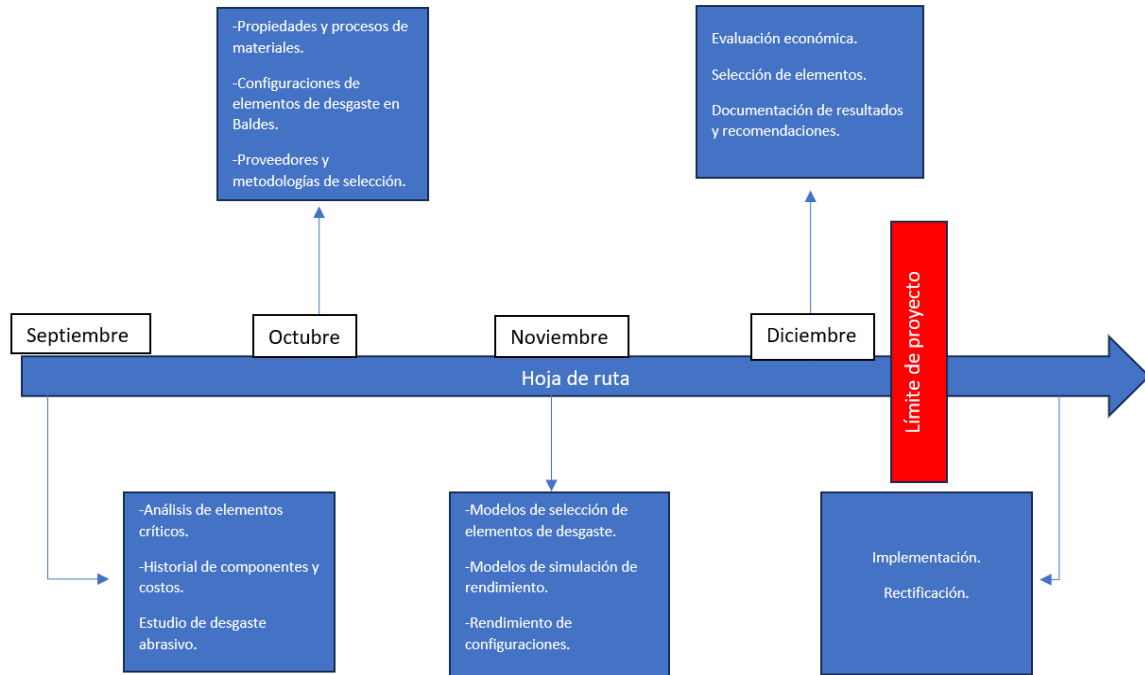


Figura 9: Hoja de ruta del proyecto (Fuente: elaboración propia).

La siguiente hoja de ruta muestra las actividades a realizar para el cumplimiento de los objetivos específicos que dan cumplimiento al objetivo general. Este proyecto solo considera las actividades hasta inicios de diciembre, destacado por una línea roja, por lo que la implementación y rectificación no se abordarán en el presente informe.

9. Desarrollo:

Se seguirá la metodología de selección de elementos de desgaste (MSED).

I. **Propiedades de los equipos:**

Como primer paso, se define el estado actual de los cargadores y algunos hallazgos de variables relevantes.

A. **Consideraciones sobre elementos de desgaste por cargador en cada faena:**

El estado actual de los equipos en cada faena se define en la sección A8 del anexo, destacándose las siguientes observaciones generales:

- La mayoría de los cargadores utilizan la serie J de Caterpillar, por lo que se modelará el rendimiento de calzas serie J para aprovechar elementos como adaptadores o entre dientes ya instalados, sobre todo en las faenas GM y ATK.
- El modelo de predicción de calzas no es compatible para configuraciones con cuchillas segmentadas o entre dientes, ya que poseen factores que requieren de un modelo distinto, por lo que se utilizó métodos alternativos para predecir su rendimiento.

B. **Holgura del cargador:**

Para definir la holgura de un cargador, se debe calcular el peso de cada balde y compararlo con su potencia de elevación junto con el peso que carga, y así definir el peso de los elementos de desgaste a instalar.

| Modelo | L150h | 992K | Wa900-8R |
|--------------------------------|-------|------|----------|
| Peso máximo de elevación (Ton) | 20.6 | 58 | 77 |
| Peso Balde (Ton) | 4.76 | 15.2 | 15.5 |
| Peso Carga (Ton) | 10.2 | 24 | 25.35 |
| Holgura (Ton) | 5.64 | 18.8 | 36.15 |

Tabla 6: Holgura de elevación cargador frontal (Fuente: elaboración propia).

Según la tabla anterior, el cargador está diseñado para permitir el blindaje alternativo de un balde dada su holgura, por lo tanto, es posible instalar elementos de desgaste como placas de blindaje.

II. Propiedades del material de extracción:

Se definen, según el contexto de las faenas descrito en detalle en el anexo A0 y la sección VII del Estado del Arte.

- **Gabriela Mistral:**

Los cargadores trabajan con material chancado de óxido de cobre principalmente y lastre ocasionalmente, generando la mayor parte del tiempo un desgaste abrasivo y en ocasiones un abrasivo-impacto. El estado final de sus calzas (Figura 10) indica un patrón que aparenta una pieza pulida en dirección contraria al esfuerzo, con rayones poco evidentes (especialmente en lastre), tomando un factor de segmentación de desgaste cercano a 1 (según lo indicado en sección VII A). Dado que el frente de ripio es el principal se recomienda acero consumible elevado y baja penetración.



Figura 10: Calza 6L-6602RC al inicio y fin de su vida útil (Fuente: elaboración propia).

- **Centinel:**

Los cargadores WA900-8R se utilizan para extraer toda la pila de lixiviación de ripio, por lo que el desgaste de sus componentes es completamente abrasivo (Figura 11), tomado un factor de segmentación de desgaste de 1. Se recomienda material de desgaste máximo y baja penetración.



Figura 11: Calza XS122RP3 al inicio y fin de su vida útil (Fuente: elaboración propia).

- **Atacama Kozan**

En esta faena subterránea se carga material tronado de sulfuro de cobre, observando calzas con cortes uniformes sobre la superficie con piquetes que se destacan del resto (Figura 12), común a un desgaste abrasivo-impacto, tomando un factor de segmentación de desgaste 2 por ser un material tronado de una faena subterránea con cargas explosivas limitadas. Se recomienda material de desgaste y penetración medios para material dinamitado.



Figura 12: Calza VOE-11417136 al inicio y fin de su vida útil (Fuente: elaboración propia).

III. Selección de candidatos

1) Información sobre de calzas de serie J:

Según lo indicado en la sección 9.I.A. se recopila información sobre calzas de serie J350 y J600 para predecir su rendimiento, lo cual se muestra en detalle en el anexo A13.

2) Selección de modelos:

Se seleccionaron las configuraciones más adecuadas para las faenas de GM, MC y ATK, considerando la sección VI – A del Estado del Arte y datos de sección 9.II del Desarrollo.

- GM: se seleccionó la configuración de labio dentado contra abrasión o labio con cuchillas segmentadas. Dado los Adapters actuales, se recomienda talla 60 para las calzas.

| Configuración | Labio | Blindaje | Herramienta de corte | Modelo |
|---------------------------------------|------------|--------------------------|---|-----------|
| GM1.- Labio dentado | Hardox 500 | Adapters y Entre dientes | Calza de abrasión de servicio pesado | 6I-6603 |
| GM2.- Labio dentado | Hardox 500 | Adapters y Entre dientes | Calza de penetración de servicio pesado | 135-9600 |
| GM3.- Labio con cuchillas segmentadas | HSL 700 | Placas bimetálicas | Cuchilla Bulldozer D9 | 7T-9126 |
| GMbase.- Labio dentado (Caso Base) | HSL 700 | Placas bimetálicas | Calza Rock Chisel | 6I-6602RC |

Tabla 7: Configuraciones GM (Fuente: Elaboración propia).

- MC: se seleccionaron configuraciones de labios con cuchillas segmentadas o entre dientes:

| Configuración | Labio | Blindaje | Herramienta de corte | Modelo |
|---------------------------------------|------------------|-------------------------|---|----------|
| MCbase.- Labio dentado (Caso base) | Original komatsu | Adapter y entre dientes | Calza de penetración de servicio pesado | XS122RP3 |
| MC1.- Labio con cuchillas segmentadas | HSL 700 | Placas bimetálicas | Cuchilla Bulldozer D9 | 7T-9126 |
| MC2.- Labio con Entre dientes | HSL 700 | Placas bimetálicas | Segmento semi flecha | 109-908 |

Tabla 8: Configuraciones MC (Fuente: elaboración propia).

- ATK: se requiere configuración con penetración y se seleccionó configuración con labio dentado:

| Configuración | Labio | Blindaje | Herramienta de corte | Modelo |
|-------------------------------------|-------|----------|---|--------------|
| ATKbase.- Labio dentado (Caso base) | Común | Común | Calza de penetración de servicio pesado | VOE-11417136 |
| ATK1.- Labio dentado | Común | Común | Calza de penetración | 1u3352PT |
| ATK2.- Labio dentado | Común | Común | Calza de servicio básico | P025BDL |

Tabla 9: Configuraciones ATK (Fuente: elaboración propia).

- Experimentos adicionales:

Se compararon configuraciones que utilizan los mismos modelos, pero de diferentes proveedores, con el fin de evaluar el aumento de la dureza en el rendimiento de los elementos.

- Comparación GM: Calza 135-9600 de LucasMaq Vs 135-9600 Janssen
- Comparación calza ATK: Calza 1U3352PT de Surac Vs 1U3352PT Janssen

En ambos casos se Janssen aporta elementos de mayor dureza, disminuyendo su tenacidad. No se lograron comparar elementos de similar dureza y distinta tenacidad.

IV. Rendimiento de elementos de configuraciones seleccionadas

a. Modelo de simulación de rendimiento para calzas

Se aplicó un estudio estadístico en Python para definir la duración de las calzas, con el fin de simular las duraciones de los modelos seleccionados.

- **Variables de decisión y objetivo en el modelo:** Se establecieron las siguientes variables de decisión comunes en la selección de elementos de desgaste:
 - 1) Tipo: Tipo de calza según su resistencia al desgaste abrasivo (Anexo A2)
 - 2) Lugar: Factor de granulometría según el mineral, (0-1) Abrasivo, (1-2) Abrasivo-Impacto y (2-3) Impacto, se utilizó para buscar relación entre faenas.
 - 3) Talla: Talla del elemento.
 - 4) Marca: Proveedor del elemento.
 - 5) Serie: Serie numerada desde la J hasta la más reciente.

- 6) Kilos: Masa de la calza/diente.
- 7) Duración: Tiempo de duración del elemento de desgaste (variable objetivo de la simulación).

1) Análisis de datos. Se realizó un análisis de los datos para encontrar relaciones y explicar fenómenos.

- Matrices de correlaciones:

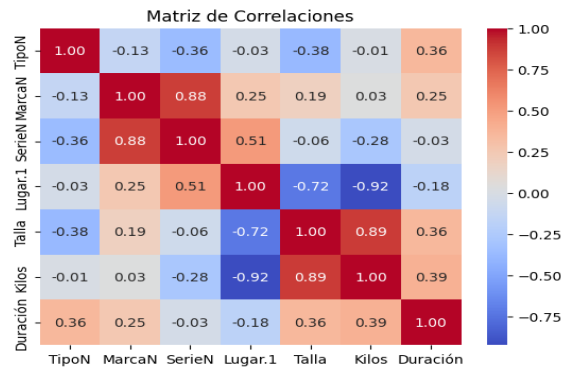


Figura 13: Matriz de correlaciones de las variables seleccionadas (elaboración propia).

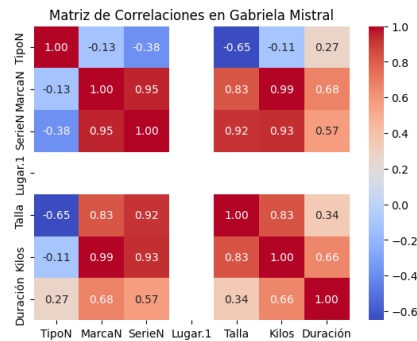


Figura 14: Matriz de correlaciones de las variables seleccionadas en GM (elaboración propia).

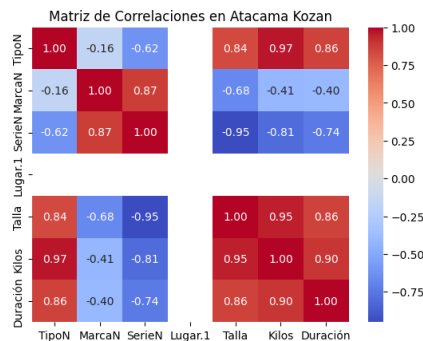


Figura 15: Matriz de correlaciones de las variables seleccionadas en ATK (elaboración propia).

2) Discusión sobre análisis de datos

- Variables con mayor correlación:

Según las relaciones mostradas en la figura 13, las variables con mayor correlación con la duración son los kilos, el tipo y la talla de la calza.

- Variables Tipo, Talla y Kilos

La masa es la variable más importante para predecir el rendimiento de una calza, sin embargo, sin la consideración del “Tipo” o la “Talla” la variable “Kilo” no se ajusta correctamente a los datos reales. Por una parte, porque el “Tipo” define la forma de la calza y cuanto se enfocará en la parte delantera y la “Talla” define el tamaño del hueco del adaptador y con ello el acero consumible de la calza (anexo A6). Por lo anterior, elementos de similar masa pueden diferir en su acero consumible, dependiendo del Tipo y Talla de la calza.

- Lugar:

La correlación de las variables aumenta considerablemente si se considera faenas individuales. Lo anterior sucede por la relación casi directa entre la masa y la duración de elementos frente a un mismo rango de granulometría. Por lo que, el “Lugar” o la “Granulometría” puede ser relevante para modelar el rendimiento de elementos de desgaste entre faenas.

- Serie y Marca:

Se evidencia una correlación negativa de las variables serie y marca, generado por la falta de variabilidad en los datos, ya que en general se utiliza la serie J y las marcas Lucasmaq y Surac, utilizando calzas de menor masa en series de proveedores de mayor calidad por su alto costo. Por lo anterior, estas variables sólo entorpecen el modelo, al no tener suficiente variabilidad para obtener un patrón que modelar.

3) Resultados de Modelos de predicción de rendimientos de calzas

En Python se generaron distintos modelos de regresión, variando el tipo y datos utilizados, buscando el mayor ajuste posible. Se inicio con regresión lineal por la facilidad de utilizarlo, partiendo con la variable con mayor correlación y se seguirá utilizando este tipo de modelo según su ajuste, de lo anterior, se probaron los siguientes modelos:

- 1) Modelo de regresión lineal simple (MRLS)
- 2) Modelo de regresión lineal múltiple (MRLM)
- 3) Modelo de árboles de decisión (Random Forest)
- 4) Modelo de regresión logarítmica múltiple (MRLGM)

Se probaron varios tipos de modelos con distintas variables de decisión utilizadas, cuyos resultados se muestran en la sección anexo A8. Estos modelos se analizaron para seleccionar los que presentaron un mayor ajuste, en base a la comparación del Coeficiente de Determinación (R²), el Error Cuadrático Medio (RMSE) y factores que indican sobre ajuste.

Sobre ajuste quiere decir que el modelo genera coeficientes no coherentes para representar los datos, mostrando un alto ajuste, pero generando un modelo acotado e inútil fuera del umbral de práctica de este.

De los modelos generados se seleccionaron dos por varios factores de rendimiento que se describen en detalle en Anexo A10.

4) Modelos seleccionados para simulación de calzas:

- a. MRLM – Regressor1: Modelo que solo puede ser utilizado en GM.

$$\text{Duración} = 26.451 * \text{Tipo} + 264.903 * \text{Lugar} - 0.3919 * \text{Talla} + 5.776 * \text{kilos} - 338.889$$

- b. MRLGM (Gaby) – MLLG: Modelo general que será usado en ATK.

$$\text{Duración} = \text{Exp}(0.348 * \text{Ln}(\text{Talla}) + 1.475 * \text{Ln}(\text{Kilos}) + 1.528)$$

Con las fórmulas siguientes se proyectó el rendimiento de las calzas que no se han probado en faena, como la configuración GM1.

El código de estos modelos se encuentra en el anexo A11.

b. Predicción de rendimiento de cuchillas 7T-9

Para obtener el rendimiento de este elemento, se calcula su duración, a través de una comparación de la exposición de la cuchilla del labio en el balde del cargador CF-8651 que se muestra en la figura 15, y el Bulldozer BD-8669 que se muestra en la figura 16.



Figura 15: Imagen de exposición de la cuchilla sobre el labio de ataque de cargador CF-8651 (Fuente: elaboración propia).



Figura 16: Imagen de medida de exposición de cuchilla sobre labio de Bulldozer CF-8669 (Fuente: elaboración propia).

Se obtuvieron las siguientes medidas (Tomadas desde el orificio del perno de la cuchilla):

| Medida | Medición Cargador | Medición Bulldozer |
|---------------------------|-------------------|--------------------|
| Orificio – Límite labio | 12 cm | 13 cm |
| Orificio – Fin cuchilla | 16.5 cm | 16.5 cm |
| Exposición de la cuchilla | 4.5 cm | 3.5 cm |

Tabla 10: Diferencia de exposición de la cuchilla (Fuente: elaboración propia)

Considerando que las cuchillas de bulldozer trabajan con ripios y otorgan una duración promedio de 600 horas (300 horas por lado) en el bulldozer BD-8669, se estimó una duración similar para el equipo CF-8651. Sin embargo, se redujo este valor a 400 horas para que el resultado real supere al estimado.

10. Evaluación económica de las configuraciones:

Se realizó una evaluación económica de las configuraciones y sus costos de implementación e instalación por faena, calculando el TCO según el costo/duración de sus componentes y el BAH.

A. Cálculo TCO:

EL cálculo del TCO considera los costos no compartidos entre configuraciones, aquellos que no cumplen con lo anterior, como el blindaje en el fondo del balde, no se consideran. El cálculo de este indicador se detalla en el Anexo A12, obteniendo los siguientes resultados:

| Configuración | Labio | Herramienta de corte | Costo de instalación y protección de labio | Costo Logística | TCO |
|---------------|---------|----------------------|--|-----------------|----------|
| GM1 | \$4.926 | \$3.409 | \$2.656 | \$ 507 | \$11.497 |
| GM2 | \$4.926 | \$3.857 | \$2.656 | \$ 977 | \$12.416 |
| GM3 | \$2.186 | \$2.667 | \$4.226 | \$1.408 | \$10.487 |
| GMbase | \$4.926 | \$5.600 | \$2.656 | \$ 879 | \$14.061 |
| MCBase | \$4.926 | \$8.000 | \$5.460 | \$ 737 | \$19.123 |
| MC1 | \$2.186 | \$2.667 | \$4.226 | \$1.408 | \$10.487 |
| MC2 | \$2.186 | \$8.286 | \$4.349 | \$1.304 | \$16.125 |
| ATKBase | - | \$3.125 | - | \$ 829 | \$ 3.954 |
| ATK1 | - | \$ 582 | - | \$ 113 | \$ 694 |
| ATK2 | - | \$3.126 | - | \$1.211 | \$ 4.337 |

Tabla 11: TCO de configuraciones (Fuente: elaboración propia).

B. De lo anterior se calculó el BAH sobre el caso base:

| Configuración | Beneficios CLP/Hrs | BAH |
|---------------|--------------------|------|
| GM1 | \$2.563 | 18% |
| GM2 | \$1.645 | 12% |
| GM3 | \$3.574 | 25% |
| MC1 | \$8.635 | 45% |
| MC2 | \$2.998 | 16% |
| ATK1 | \$3.260 | 82% |
| ATK2 | -\$382 | -10% |

Tabla 12: Beneficios y BAH de configuraciones (Elaboración propia).

C. Tablas de comparación con caso base:

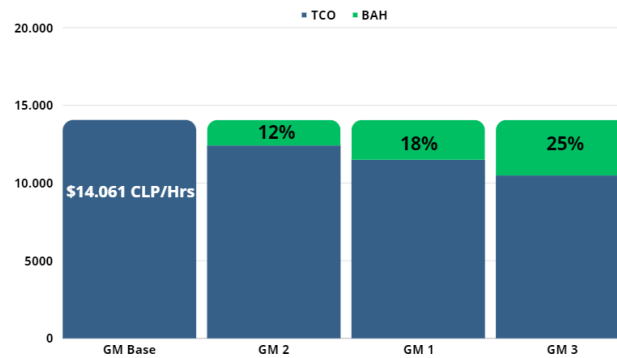


Tabla 13: TCO y BAH de configuraciones (Fuente: elaboración propia).

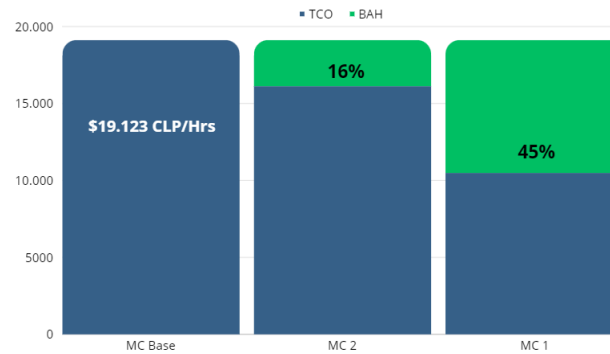


Tabla 14: TCO y BAH de configuraciones (Fuente: elaboración propia).

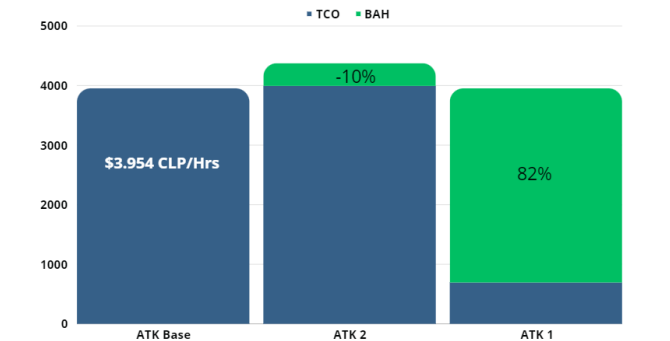


Tabla 15: TCO y BAH de configuraciones (Fuente: elaboración propia).

11. Resultados y recomendaciones:

Sobre el rendimiento de las configuraciones de balde recomendadas se destaca el ranking según su TCO y BAH:

- Gabriela Mistral:

$$GM3 > GM1 > GM2 > GMbase$$

Se recomienda utilizar las configuraciones GM1 (labio dentado con calza de abrasión de servicio pesado) y configuración GM3 (labio con cuchillas de bulldozer), considerando que estos elementos de desgaste logran cumplir el objetivo general de una reducción del TCO > 15% en comparación con el caso base, mostrando un 18% y 25% de reducción del TCO, respectivamente. Finalmente, se recomienda mínimo un cargador con la configuración GM1 por extracción de lastre y por compatibilidad del Adapter en uso actual y la configuración GM3 cuando el labio se haya destruido en los otros dos equipos.

Sobre la calza 135-9600 de distintos proveedores, variando la dureza del material y manteniendo la tenacidad (Se omiten propiedades para evitar problemas). Los resultados arrojaron un aumento de 50 horas respecto al promedio del proveedor inicial, que el BAH entre los TCO de las configuraciones de los elementos de ambos proveedores es <1%, por lo que no logra reducir un 15% el TCO, sin embargo, demuestra que una elevación de esta propiedad aporta un mayor rendimiento.

- Minera Centinela:

$$MC1 > MC2 > MCbase$$

En MC la configuración MC1 obtiene el mejor TCO, además de cumplir con el objetivo general de una reducción del TCO > 15% en comparación con el caso base, mostrando un 45% de reducción. Por lo anterior todos los cargadores de MC deberán pasar a la configuración MC1.

- Atacama Kozan:

ATK1 con calza CAT 1U3352PT es el mejor candidato, presentando una penetración idónea para material tronado. La calza de servicio básico de Komatsu presentó el menor rendimiento, aunque lo anterior no indica que la calza Komatsu sea de mala calidad, sino que, es un elemento de desgaste que se encuentra realizando una tarea para la cual no fue diseñada.

En esta faena, se esperan los resultados de las pruebas de elementos de desgaste entre diferentes proveedores con el mismo modelo de calza 1U3352PT, con lo cual se definirá si se logra la meta de reducción del 15% del TCO.

Por requerimiento de Besalco Minería, en la tabla 15 se muestran los costos de las configuraciones seleccionadas por hora, tonelada, y cargador de las faenas (Los rendimientos de las faenas para obtener el costo por tonelada son aproximados y se omitirán por requerimiento de Besalco Minería).

| Faena | Costo por hora | Costo por tonelada |
|-------|------------------|--------------------|
| GM | 10.487 CLP (GM3) | 8.73 CLP (GM3) |
| | 11.497 CLP (GM1) | 9.58 CLP (GM1) |
| MC | 10.487 CLP (MC1) | 8.06 CLP (CM1) |
| ATK | 694 CLP (ATK1) | 4.33 CLP (ATK1) |

Tabla 16: Costos por hora y tonelada de configuraciones seleccionadas.

12. Discusión y Conclusiones:

I.- Desgaste abrasivo:

En el presente proyecto se investigó el desgaste abrasivo y su relación con los elementos de desgaste en mineras, destacando los siguientes puntos:

- La duración de los elementos de desgaste frente al desgaste abrasivo tiene una estrecha relación con la masa de desgaste, dando la posibilidad de modelarlo en la extracción de cobre, considerando la masa, la talla y el modelo del elemento, logrando modelar un patrón de aumento en la duración.
- Este patrón aumenta y disminuye su pendiente, según varios factores, como la granulometría del material. Este factor depende de los procesos que experimenta el mineral, siendo una variable importante para el desarrollo de un modelo general, independiente de la faena.

II.- Recomendaciones sobre la selección de elementos de desgaste:

- No se debe priorizar la duración del elemento de desgaste frente a la penetración, ya que trabajar en materiales sin la penetración adecuada provoca un desgaste mayor en los sistemas neumáticos e hidráulico de los equipos.
- Evaluar cuidadosamente la selección de elementos alternativos, cuya función no sea el de resistir a un desgaste abrasivo y servir de herramienta de corte, ya que podrían generar un peor rendimiento como el caso de labio con entre dientes de MC.

III.- Sobre el cumplimiento del objetivo general y específicos:

- Sobre el objetivo SMART, se logró generar un análisis que permitió mejorar el rendimiento de los elementos de desgaste de baldes de los cargadores frontales, cumpliendo el KPI objetivo de reducción de un 15% del TCO en GM y MC.
- Sobre los objetivos específicos, el primero y el segundo se cumplieron al entregar el contexto necesario para el desarrollo de una metodología de selección de elementos de desgaste en baldes de cargadores frontales. El tercero y el cuarto se lograron, con la evaluación y selección de las configuraciones seleccionadas, permitiendo aumentar el rendimiento de estos en las faenas designadas.

IV.- Beneficios de utilizar el estudio:

- El presente proyecto permite estandarizar escenarios para distintos minerales de extracción, permitiendo conocer los costos y definir los elementos de desgaste adecuados para cada caso que se evalúe.
- Un análisis sobre los elementos de desgaste permite disminuir el TCO, disminuir tarifas de servicios, mejorando la competitividad de Besalco Minería y los resultados financieros del negocio.

V.- Recomendaciones para el futuro:

- Se recomienda seguir con el historial de elementos de desgaste y extenderlo a todas las faenas de Besalco, con el fin de enriquecer el modelo de selección de calzas y tener un cálculo preciso de la duración promedio de elementos de desgaste en baldes de cargadores. Este historial se debe complementar con la data de otros modelos de calzas y no solo con mayor historial de modelos ya documentados.
- El presente trabajo debe considerarse como oportunidad para investigar otros sistemas con elementos de desgaste, tales como, neumáticos, rodados, palas, etc., posibilitando la evaluación de ahorros con una selección fundamentada.

Referencias

1. "GUTIÉRREZ, J.C., LEÓN SEVILLA, L.M., MESA GRAJALES, D.H., & TORO, A.A. (2004). EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA AL DESGASTE ABRASIVO EN RECUBRIMIENTOS DUROS PARA APLICACIONES EN LA INDUSTRIA MINERA. Scientia Et Technica, 2(25). <https://doi.org/10.22517/23447214.7217>"
2. "CAICEDO, H., Valdés O. J.A., & Coronado Marín, J.J. (2005). Caracterización de recubrimientos duros frente al desgaste abrasivo a tres cuerpos. Tecnura 9/17, 16-24."
3. "Ramón cortés P, Jaime Villanueva A, Ernesto Ponce L, Manuel Rojas M, Eduardo Rojas Z. (2004). Estudio de la soldabilidad y corrosión del Acero Inoxidable AISI 904L con los agentes utilizados en la lixiviación del cobre. Revista Facultad de Ingeniería, U.T.A, (Chile). VOL 12. pp 43-56."
4. DÍAZ DEL CASTILLO RODRÍGUEZ, F. (2007). Hierros fundidos. Facultad de estudios superiores Cuautitlán. Universidad Nacional Autónoma de México. México.
5. FLORES MEJÍA, J.A. (2020). Operación de cargador frontal. Disponible en: <https://www.maquinariaspesadas.org/blog/2862-curso-cargador-frontal-estructuras-mecanismos-cucharones-puntas>
6. "Fernández Pariente y F.J. Belzunce Varela. (2006). Influencia de diversos tratamientos térmicos en la microestructura de una fundición blanca con alto contenido de cromo. Revista de metalurgia. 42(4), pp 279-286."
7. Paolo Fuentes, Jaime Villanueva, Edgar Estupiñán. (2018). Análisis del desgaste en componentes de cargadores frontales, mediante modelo basado en elementos finitos. Ingeniare. Revista chilena de ingeniería, VOL 26 N°4, pp. 612-621."
8. Fanny Guzmán, Alexis Guzmán, Daniel González, Rossana Sepúlveda. (2022). Análisis del desgaste de dos aceros comerciales de la serie 400HB sometidos a un régimen impacto-abrasivo. Ingeniare. Revista chilena de ingeniería. Vol30 no.3, pp 528-537."
9. Servicio Nacional de Geología y Minería de Chile. "Anuario de la minería de Chile 2019". Fecha de consulta: 30 de julio de 2020. URL: <https://www.sernageomin.cl/anuario-de-la-mineria-de-chile/> [Links]
10. Flasisur. Maquinaria Pesada "Cargador frontal" <https://web.flavisur.edu.pe/carreras/operacion-de-maquinaria-pesada/> [Links]
11. Codelco Educa. "Chancado "Reduciendo la roca"". 2019. URL: https://www.codelcoeduca.cl/codelcoeduca/site/artic/20190109/asocfile/20190109004934/chancado_media_tcnico_060119.pdf [Links]

Anexo:

A0. Información sobre faenas de estudio:

A. Equipos en faenas:

| Equipo/Especificación | L150 | 992k | WA900-8R |
|-----------------------------|------|-----------|-----------|
| Peso (Ton) | 21,9 | 99,83 | 116,4 |
| Neumático | 26,5 | 45/65 R45 | 45/65 R45 |
| Capacidad cuchara máxima m3 | 3,8 | 12,3 | 13 |
| Capacidad cuchara mínima m3 | 3,8 | 10,7 | 11,5 |
| Potencia Motor kW | 180 | 607 | 671 |

Tabla 17: Especificaciones de cargadores en las faenas designadas (Fuente: elaboración propia).

En cada una de las tres faenas se trabajan con cargadores de mismo modelo; Volvo L150 en Atacama Kozan, Caterpillar 992K en Gabriela Mistral y Komatsu WA900-8R. Donde se destaca que por la diferencia de potencia, tamaño y capacidad de cuchara.

B. Ciclo de extracción de cargadores frontales en faenas

- **Gabriela Mistral:**

Gabriela Mistral es una minera a tajo abierto administrada por Codelco, especializada en la extracción de cobre en forma de óxidos (3.5-4 Escala Mohs). Su ciclo de operación inicia con la extracción de mineral, el cual se tritura y acumula por un apilador para el proceso de lixiviación en pilas con ácido sulfúrico. Finalmente, el ripio resultante de las pilas es transportando a botaderos por la roto pala.

Es en este último proceso es donde trabajan los cargadores frontales 992K, encargados de extraer el ripio de las zonas donde la roto pala no puede acceder. Además, en ocasiones, los cargadores ayudan con la extracción de lastre, que es material con baja cantidad de cobre.

- **Centinela**

Centinela es una minera de cobre operada por Sierra Gorda y su proceso extracción tiene similitudes con la minera Gabriela mistral. La diferencia radica en que el trabajo que ejercen los cargadores WA900-8R es extraer toda la pila de ripio resultante del proceso de lixiviación.

Por lo tanto, los cargadores frontales de centinela se encargan de extraer material chancado de óxido de cobre (Dureza 3.5-4 Mohs), para trasladarlos a botaderos.

- **Atacama Kozan**

Atacama Kozan es una minera subterránea especializada en la extracción de sulfuro de cobre (dureza 5-6.5 Mohs). Su operación inicia con la perforación de la roca a cargo del Jumbo minero. Luego el material es tronado por cargas explosivas y cargado por cargadores frontales para el chancado primario en el interior de la mina. Posteriormente es transportado por medio de correas al chancado secundario en la superficie. Finalmente, el material chancado se dirige a la planta de procesamiento, para obtener el concentrado de cobre por medio del proceso de flotación.

A1. Materiales y tratamientos utilizados para el desgaste abrasivo:

A. Fundiciones

Las fundiciones son, como los aceros, aleaciones de hierro y carbono. Estos contienen un elevado porcentaje de carbono entre 2-6.7%, por lo que suelen ser frágiles, por lo que a menudo se usan solo con un 2.5 – 5% de carbono. Por lo anterior, la ductilidad del hierro fundido es relativamente baja, lo que genera que no puedan laminarse, estirarse o trabajarse en frío o en caliente, sin embargo, se puede vaciar en hornos o moldes, para fabricar piezas de distintas formas y tamaños y aunque no son soldables, si son elementos duros y resistentes a la corrosión y a los tipos de desgaste (Díaz, 2007).

Dado lo anterior, los hierros fundidos son una solución barata por su posibilidad de fundirse en moldes, pero presenta una elevada fragilidad. Esta desventaja puede atenuarse por medio de diferentes elementos de aleación y tratamientos térmicos que pueden modificar la microestructura, otorgando distintas propiedades (Díaz, 2007).

B. Fundiciones Blancas:

De lo anterior, se introducen las fundiciones Blancas, estas obtienen su nombre por el color que se muestra al fracturarse. Se genera al enfriar rápidamente el elemento de hierro fundido desde un estado líquido, proceso que se llama templado, generando una matriz de acero rica en martensita gracias al rápido enfriamiento. Las fundiciones blancas varían según la temperatura y velocidad de templado. Además de lo anterior, estas fundiciones pueden pasar por un proceso de calentamiento menor al templado y un tiempo mayor de enfriamiento llamado revenido, que genera una microestructura más estable llamada martensita revenida. (Díaz, 2007). Este material se caracteriza por ser de los materiales más resistentes al desgaste, al impacto térmico, excelente maquinabilidad y poca capacidad de soldadura a costa de una menor ductilidad. (Díaz, 2007).

C. Fundiciones Aleadas:

El acero puede contener más elementos de aleación como Ni, Cr, Mo, Cu, etc. Estos componentes que se catalogan en baja y media aleación modifican la microestructura del elemento otorgando distintas propiedades según su cantidad. Estos elementos modifican los puntos críticos del acero, causando distintas propiedades resultantes del templado y el revenido, ayudando a otorgar Dureza o Tenacidad al material. (Díaz, 2007). Esto permite utilizar aceros bajos en carbono con elementos de aleación que permiten alcanzar durezas elevadas y menos frágiles, resultando en elementos resistentes al desgastaste abrasivo.

A2. Elementos de desgaste y su criticidad en baldes de cargadores frontales:

| Elemento | Descripción |
|------------------------|--|
| Dientes/Calzas: | <ul style="list-style-type: none"> -Elemento de desgaste con la función de penetrar en el mineral y proteger el Labio de ataque y el Adapter, este elemento presenta un desgaste que disminuye su espesor y su largo en dirección al esfuerzo, midiendo su vida útil según su largo respecto al Adapter y su material de desgaste presente. -Se fábrica de materiales de elevada dureza, por lo que son resistentes al desgaste abrasivo, pero no soldables. -Este elemento se considera crítico, por su función y su corta vida útil. |
| Entre dientes: | <ul style="list-style-type: none"> -Elemento de desgaste con la misión de proteger el labio de ataque, el lateral del Adapter y evitar el sobre desgaste del diente. -El desgaste de este elemento se presenta de forma lineal, acabando con fractura por corte durante los trabajos si el desgaste es muy pronunciado. -Se fabrica con materiales duros según como se instale en el balde, duro si es apenado y menos duro si se suelda al labio. -No se considera elemento crítico, ya que su vida útil es elevada, por lo que en ocasiones se suelda al labio de ataque hasta que se desprende. Existen ocasiones donde se utilizan Entre dientes en lugar de dientes y Adapters simulando una cuchilla segmentada, en estos casos este elemento pasa a ser crítico al tener la función de un diente. |

| | |
|---------------------------|---|
| Adapter | <ul style="list-style-type: none"> -Elemento que sirve de conexión entre labio de ataque y Diente, a través de un pasador. -Su desgaste se mide por el estado del alojamiento del pasador para la unión Adapter-Diente, que sufre un mayor esfuerzo a medida que disminuye el material de desgaste de la calza. - Se fabrica con acero más blando, pero más resistente al impacto que los dientes/calzas, dependiendo si van soldados o apenados al labio de ataque. -Se considera un elemento crítico que se debe preservar en lo posible, por su función y elevado precio, sin importar su larga vida útil. Lo anterior, porque este elemento se suele soldar al labio en cargadores que trabajan en proyectos mineros. |
| Esquineros | <ul style="list-style-type: none"> -Elemento de desgaste que se instala en las esquinas inferior-frontal del balde, sirven para protegerlo de sobre esfuerzo sobre las esquinas. -Muchas veces no se encuentra en Baldes de cargador frontal y se puede reemplazar por placas de blindaje. |
| Placas de Blindaje | <ul style="list-style-type: none"> -Elementos que tienen la función de blindar el balde, protegiendo la estructura principal y el labio. - Generalmente su composición depende de la zona que se quiera blindar, T500 para el fondo del balde, Bimetálica para el labio. Estos materiales comparten ser aceros estructurales tratados con temple y revenido. -El desgaste de este elemento se presenta en los bordes perpendiculares a la dirección de trabajo y al llegar a su punto crítico, tienden a desprenderse del balde. -Originalmente este elemento no suele llegar con el Balde, instalándose cuando se manda el balde a reparar. -Este elemento es crítico por su función y se debe tener cuidado en su instalación, ya que suponen un peso extra para el equipo y pueden llegar a fracturar el labio de ataque si no se tiene cuidado con su soldadura. |
| Laterales | <ul style="list-style-type: none"> -Elemento de desgaste con el objetivo de proteger las planchas frontales horizontales del balde. -Su vida útil es larga y no es un elemento de desgaste crítico, pues no se encuentra en la zona de mayor esfuerzo del Balde, como se verá más adelante. |
| Labio | <ul style="list-style-type: none"> -Es el labio de ataque del Balde, en él se instalan todos los elementos de desgaste inferiores, por lo que se considera un elemento crítico, ya que su desgaste limite significa la detención total del cargador y traslado a taller para reparación de balde. -El conjunto Diente, Adapter y Entre diente tienen la función de proteger el labio de ataque. -Al desgastarse el original, suelen cambiarse por labios de HSL700 para configuraciones de cuchillas segmentadas y Hardox 500 para calzas y porta calzas. |

Tabla 18: Descripción de elementos comunes en baldes o cucharones de cargadores frontales (Fuente: elaboración propia).

A3. Catálogo de Calzas de proveedores:

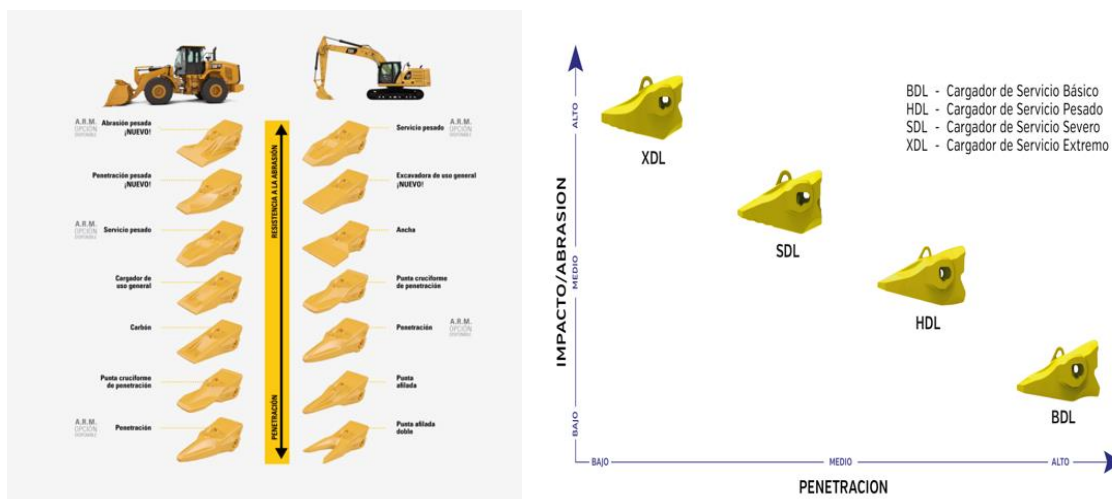


Figura 17: Calzas de nueva generación según resistencia a la abrasión y la penetración del material de Caterpillar (Izquierda) y Komatsu (Derecha).



Figura 18: Tipos de calza según su resistencia al desgaste, material de desgaste y penetración (ASDC0164, 2001).

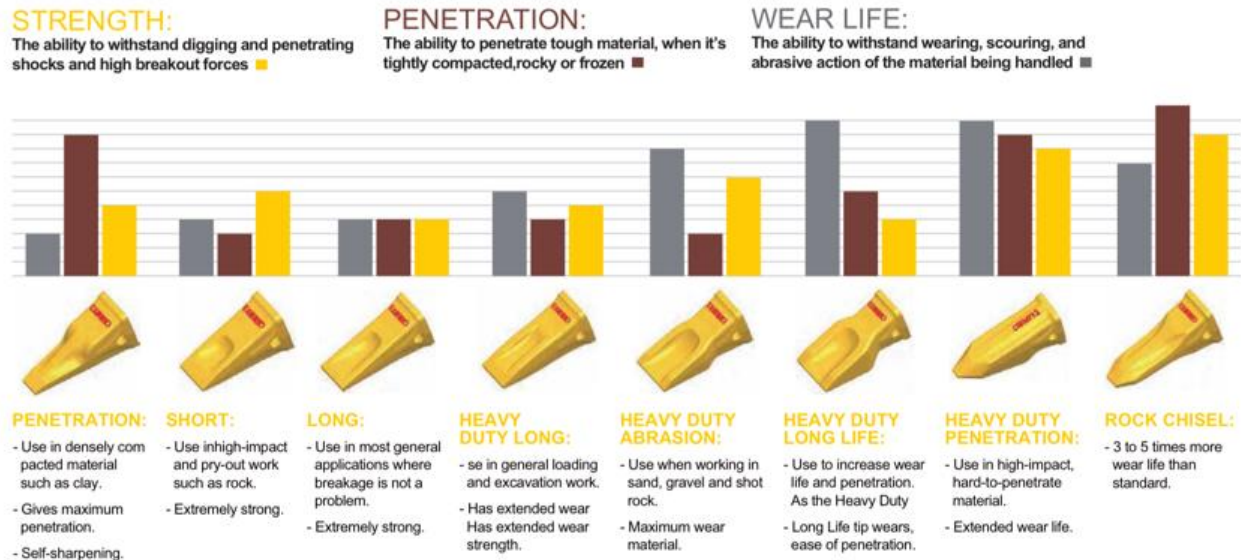


Figura 19: Tipos de calza según su resistencia al desgaste, material de desgaste y penetración (Catalogo Fp).

A4. Modelo según penetración requerida

Dados los tipos de calzas comunes para todas las tallas de la serie J de Caterpillar, se genera una tabla de comparación con los tipos de dientes tradicionales y sus aplicaciones, según la página oficial de Caterpillar Parts.cat.com.

| Tipo de Calza | Aplicaciones |
|-----------------|--|
| HD Abrasión | -Materiales de abrasión alta como la arena, grava y roca triturada. -Para cargadores frontales. |
| HD Penetrator | -Materiales de alto impacto y difíciles de penetrar -Versión de Rock Penetrator con mayor material de desgaste, pero menor penetración. -Para cargadores frontales. |
| Rock Penetrator | -Materiales altamente abrasivos y densamente compactados, como tronadoras de media carga explosiva. -Para cargadores frontales. |
| Hd Long | -Alta resistencia a la abrasión. -Para impacto bajo a moderado. -Para Cargadores y excavadoras. |
| HD Rock Chiesel | -Versión de Rock Chisel con mayor material de desgaste, pero con menor penetración. -Para excavadoras. |
| Rock Chiesel | -Áreas de impacto de moderado a alto. -Material compactado densamente (Arcilla). -Materiales difíciles de penetrar, como grava con cemento roca sedimentada y roca levemente triturada (Tronada baja carga explosiva). -Para excavadoras. |
| Long | -Excavación y carga en general. -aplicaciones de impacto alto a medio. -Para excavadoras. |
| Penetrator | -Diseñado para materiales compactados densamente. -Penetración Máxima. -Material de desgaste mínimo. -Para excavadoras. |
| Short | -Diseñado para aplicaciones de alto impacto con en la que se requiere una elevada fuerza de desprendimiento. -Para excavadoras. |

Tabla 19: Tabla de aplicaciones de tipos de calza de Caterpillar (Fuente: elaboración propia).

A5. Inspección del desgaste:

- a. Desgaste abrasivo: Común al trabajar en minerales chancados con baja granulometría, se genera por partículas que provocan pequeños cortes en una elevada cantidad, dando lugar a un patrón de desgaste uniforme en dirección contraria al esfuerzo del cargador (Figura 8). Ante este desgaste se recomienda herramientas de corte con baja penetración y mayor cantidad de material de desgaste. Se le asigna un valor entre 0 y 1 según el propósito del chancado.



Figura 20: Calza con patrón de desgaste abrasivo (Fuente: elaboración propia).

- b. Desgaste Abrasivo-Impacto: Común al trabajar con minerales con alta granulometría, se genera por partículas que provocan grandes cortes en una baja cantidad, dando lugar a un patrón de desgaste con cortes pronunciados no uniformes que tienden en dirección al esfuerzo del cargador (Figura 9). Ante este desgaste se recomienda usar calzas con penetración máxima para evitar esfuerzos innecesarios al cargar contra el material. Este tipo de desgaste se encuentra en materiales con procesos de granulometría mayor a 1 metro de diámetro, tomando un valor entre 2 y 3. Es inusual en la minería.

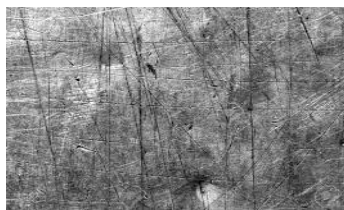


Figura 21: Patrón de desgaste por Impacto (Fuente: elaboración propia).

- c. Desgaste Impacto: Común al trabajar con minerales con baja-media granulometría, se genera por partículas que provocan cortes pequeños y cortes grandes, dando lugar a un patrón de desgaste uniforme y adicionalmente cortes y piquetes más pronunciados en dirección al esfuerzo del cargador (Figura 10). Ante este desgaste se recomienda usar herramientas de corte con media penetración y cantidad de material de desgaste. Se evidencia al trabajar con materiales con proceso de tronadura por carga explosiva y que se dirigen a chancadores, asignándole un factor entre 1 y 2 según el límite en la carga explosiva(calidad) de la tronadura.



Figura 22: Calza con patrón de desgaste por Impacto-Abrasivo en faena subterránea (Fuente: elaboración propia).

A6. Inspección de material de desgaste en calzas:

Según la metodología de mantenimiento de calzas de Komatsu, la medición de material de desgaste en las calzas de cargador frontal se debe realizar en 3 pasos:

- a. Inspección de calza: Se debe medir la longitud total del diente desde la nariz (Lt) y La longitud Remanente (Surcó Adapter), para estimar una distancia de seguridad (Acero Consumible), como se muestra en la imagen:

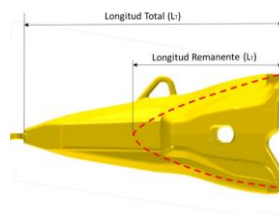


Figura 23: Medidas necesarias para inspección de mantención de calzas (Instalación y mantenimiento, Komatsu Chile).

b. Medición Manual: Se debe medir la longitud de la calza desde la punta hasta el otro extremo pasando por el pasador y la medida de la nariz del adapter, con lo anterior se obtiene la medida de Acero consumible, como se ve en la siguiente figura:

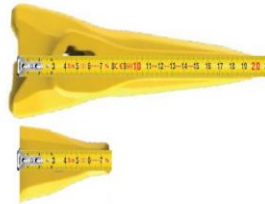
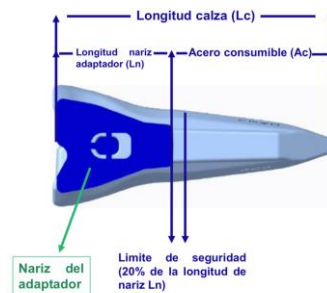


Figura 24: Método de medición de largo en calza y nariz de adaptador (Instalación y mantenimiento, Komatsu Chile).

c. Medida de seguridad: De la medida de acero consumible considera un 20% de la medida de la nariz del adapter, para asegurar no dañar la integridad del adapter, obteniendo las siguientes



medidas:

Figura 25: Medidas de calza de acero consumible con factor de seguridad (Instalación y mantenimiento, Komatsu Chile).

A7. Correcta operación del cargador frontal:

13. Buena Penetración inicial:

- 13.1 Chuchara debe rozar ligeramente el suelo
- 13.2 Regular penetración inicial según el material (Angulo de entrada)
 - 13.2.1 Mucha penetración no levanta
 - 13.2.2 Poca penetración no llena la cuchara

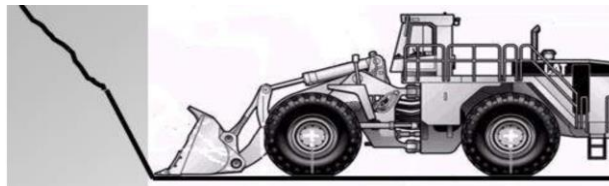


Figura 26: Operación de cargador (Instalación y mantenimiento, Komatsu Chile).

14. Levantar la Cuchara: Cuando el balde penetre en el material, levantar para compartir el peso del Balde/Material entre los ejes delanteros y traseros, para mejorar la tracción.

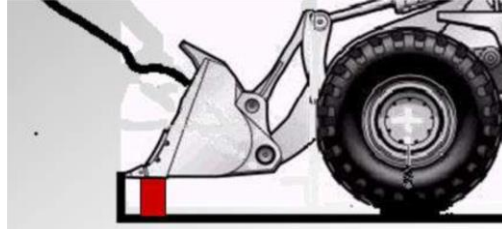


Figura 27: Operación de cargador (Instalación y mantenimiento, Komatsu Chile).

15. Mantener buena tracción: Levantar Cuchara para compartir constantemente el peso entre el eje delantero y trasero.

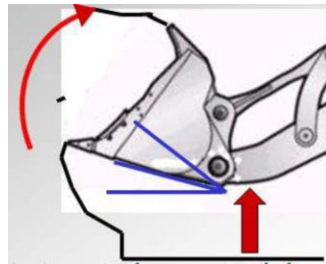


Figura 28: Operación de cargador (Instalación y mantenimiento, Komatsu Chile).

A8. Elementos de desgaste por cargador en cada faena:

| Equipo - Especificaciones | CF-8651 | CF-8652 | CF-9513 |
|--------------------------------|--|-------------------------------|------------------------------|
| Elemento de perforación(calza) | REPARACIÓN, Balde nuevo | ENTREDIENTES Y DIENTES | ENTREDIENTES Y DIENTES |
| Tipo de calza | Próximamente - Cuchillas de Bulldozer D9 | Rock Chiesel | HEAVY DUTY PENETRATOR |
| TALLA | - | 60 | 60 |
| Marca | Lucasmaq | CATERPILLAR ALT | CATERPILLAR ALT |
| Modelo de calza | - | DIENTE SERIE 60 HD, 6I-6602RC | DIENTE SERIE 60 HD, 135-9600 |
| Numero de calzas | - | 8 | 8 |
| Proveedor Calzas | - | Lucas Maq | Lucas Maq |
| Adapter | - | LCM 6I-6604 | LCM 6I-6604 |

| | | | |
|---------------|------------|----------------------------------|----------------------------------|
| Entre dientes | - | 1/2 Arrow Segment 2755460/1/2 | 1/2 Arrow Segment 2755460/1/2 |
| ESTRUCURA | EN PROCESO | Original | Blindado |

Tabla 20: Elementos de desgaste críticos actuales de cargador 992k de Gabriela Mistral (Fuente: elaboración propia).

| Equipo - Especificaciones | CF-8769 | CF-9510 | CF-9511 |
|--------------------------------|-------------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Elemento de perforación(calza) | Diente, Entre diente | Entre diente | Entre diente |
| Tipo de calza | XS EXTREME SERVICE | Half Arrow | Half Arrow |
| TALLA | 120 | - | - |
| Marca de calza | KOMATSU CHILE | Caterpillar alternativo | Caterpillar alternativo |
| Modelo de calza | DIENTE XS122RP3 | 109908/03/13/23 | 109908/03/13/23 |
| Numero de calzas | 8 | 15 | 15 |
| Proveedor Calzas | Komatsu Chile S.A. | Lucas Maq | Lucas Maq |
| Adapter | 350XS122 | - | - |
| Entre diente | 1/2 arrow segment 2755460/1/2 | - | - |
| PLANCHAS CENTRALES | - | T500 | T500 |
| PLANCHAS INFERIORES | - | T500 | T500 |
| ESQUINEROS-canilleras | 1U0740 | - | - |
| ESTRUCURA | ORIGINAL | BLINDADO | BLINDADO |

Tabla 21: Elementos de desgaste críticos actuales de cargador 992k de Centinela (Fuente: elaboración propia).

| Equipo - Especificaciones | CF-5788 | CF-5789 | CF-5790 |
|--------------------------------|------------------------------|---|----------------------------|
| Elemento de perforación(calza) | Diente y Entre diente | Diente y Entre diente | Diente y Entre diente |
| Tipo de calza | Loader Penetrator | Penetración Kprime Servicio estándar | Punta Roquera |
| TALLA | 35 | 35 | 30 |
| Marca de calza | CATERPILLAR ALT Surac | KOMATSU/Hensley | VOLVO |
| Modelo de calza | Diente serie 35 HD, 1u3352pt | Diente P025 | DIENTE 30AMRL VOE-11417136 |
| Numero de calzas | 8 | 8 | 8 |
| Proveedor Calzas | SK Comercial SPA | SK Comercial SPA | SK Comercial SPA |
| Adapter | 35 HD 3G6304 | P025P | VOE-1147136 |
| Entre dientes | - | - | - |
| ESTRUCURA | Original | Original | Original |

Tabla 22: Elementos de desgaste críticos actuales de cargador 992k de Atacama Kozan (Fuente: elaboración propia).

Casos Especiales:

Cargador CF-8651: Cargador en proceso de instalación de cuchillas de bulldozer a lo largo del labio.



Figura 29: Balde de cargador CF-8651 con labio para cuchillas de bulldozer (Fuente: elaboración propia).

Cargadores CF-9510 y CF-9511: Cargadores con entre dientes a lo largo del Labio.



Figura 30: Balde con entre dientes a lo largo del labio como los cargadores CF-9510 y CF-9511 (Fuente: elaboración propia).

A9. Resumen de Elementos de desgaste por cargador en cada faena:

Se generó un levantamiento de la configuración actual del balde de los cargadores, ver anexo A6.

Que se resumirá en esta sección:

- Gabriela Mistral:

CF-8651: Cargador con balde con labio nuevo modificado con cuchillas de bulldozer a lo largo del labio. Es un cargador con su estructura blindada no original.

CF-8652: Cargador con configuración para serie J600(Talla 60) de Caterpillar. Utiliza frecuentemente calzas Rock Chisel 6I-6602RC y con blindaje original.

CF-9511: Cargador con balde configurado para serie J600 de Caterpillar. Utiliza frecuentemente calzas de Penetración de servicio pesado 135-9600 con blindaje original.

- Centinela:

CF-8769: Cargador con balde de configuración para serie XS (talla 120) de Komatsu original. Utiliza calza Rock Penetrator XS122RP3 con blindaje original. Este cargador se encuentra en proceso de destrucción de balde.

CF-9510: Cargador con balde modificado con Entre dientes a lo largo del labio en lugar de calzas-adapters y blindado de labio con placas Bimetálicas y T500 en cucharón.

CF-9511: Cargador en igual estado que CF-9510.

- Atacama Kozan:

CF-5788: Cargador con Balde modificado para serie J350(Talla 35), utiliza actualmente la calza de penetración de roca 1U352PT, con blindado original.

CF-5789: Cargador con Balde Komatsu para serie P025(Talla 25), utiliza actualmente la calza de servicio estándar P025 BDL, con blindado original.

CF-5790: Cargador con Balde y calza de roca original volvo VOE-11417136 de talla 30.

A10. Ejemplo de calzas para excavadora y pata cargador frontal:

Diferencia de simetría en calzas de excavadora y cargadores:



Figura 31: Calza Rock Chiesel para excavadoras (Fuente: Part.cat.com).

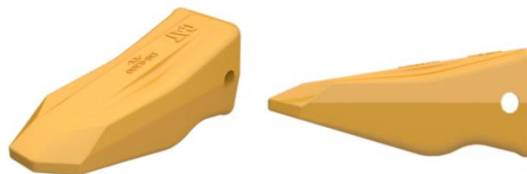


Figura 32: Calza de penetración de servicio pesado para cargadores frontales (Fuente: Part.cat.com).

Consecuencias de utilizar calzas de excavadoras en cargadores:



Figura 33: Inicio y fin de vida útil de calzas Rock Chisel de excavadoras utilizadas en un cargador frontal (Fuente: elaboración propia).

A10. Rendimientos de modelos para predicción de duración de calzas:

| Modelo | R ² | RMSE | Comentarios |
|----------------------------|----------------|---------------|---|
| MRLS - RegressorSG | 0.555 | 64.622 | -Modelo con bajo ajuste. -Se recomienda usar múltiples variables, ya que la duración depende de múltiples factores. |
| MRLM - Regressor | 0.708 | 52.001 | - Presentó ajuste adecuado, sin embargo, presenta un coeficiente negativo para la variable Kilo, lo cual es un error de sobre ajuste. -Se recomienda utilizar menos variables para evitar sobre ajuste. |
| MRLM – Regressor1 | 0.618 | 59.449 | -Modelo capaz de medir rendimiento entre faenas, con valor de ajuste intermedio. -Se utilizará por poseer un mayor ajuste que el modelo Regressor13. -Se debe tener cuidado con coeficiente de Tipo, que ha generado sobreajuste en otros modelos. |
| MRLM – Regressor13 | 0.596 | 61.157 | - Modelo adecuado para representar calzas entre faenas, -Pese a no presentar el mayor ajuste es el modelo que ha logrado predecir la duración de otras faenas, solo con la Talla, el Lugar y Kilogramos. |
| MRLM (GABY) – Regressor2 | 0.637 | 58.360 | -Modelo con ajuste adecuado, pero acotado solo a Gabriela Mistral. -Al no utilizar la granulometría, el modelo logro representar los datos de Gabriela Mistral, con la talla y kilogramos. -Sera utilizado para predecir el rendimiento en faena. |
| MRLM (ATK) – Regressor3 | 0.803 | 40.357 | -Modelo con ajuste adecuado, pero acotado a Atacama Kozan. -Ajuste elevado por baja variabilidad en variables Lugar, Talla y Tipo, dando lugar a un sobreajuste de la variable tipo. |
| Random Forest – RDF1 | 0.705 | 52.198 | -Modelo alternativo. -Presento ajuste Adecuado, pero se descarta por no ser apto para variables continuas, por presentar predicciones en por segmentos. |
| MRLGM - MLL | 0.705 | 55.63 | -Presenta ajuste adecuado y no estar acotado a una faena, pero presenta sobre ajuste con la variable de granulometría. |
| MRLGM (GABY) - MLLG | 0.683 | 55.67 | - Mejor modelo para proyectar Gabriela Mistral. - Modelo adecuado para proyectar calzas. - Se evita sobreajuste por cantidad baja de variables. |
| MRLGM (ATK) - MLLATK | 0.832 | 40.43 | -Mejor modelo que Regressor3, pero acotado a una faena. -Modelo con sobreajuste, es decir sobredimensiona el coeficiente, por un ajuste forzado o sobreajuste a los datos. |

Tabla 23: Tabla de resultados de modelos de predicción de rendimiento de calzas (Fuente: elaboración propia).

A11. Código de Python de modelos de simulación de calzas en Colab:

https://colab.research.google.com/drive/1huPL0Fvg2JWi7rOVBE0_03ALpUuDCvCo?usp=sharing

A12. Cálculo de TCO:

1.- Adecuamos la fórmula del TOC para nuestro escenario:

$$TCO = \text{Costos de elementos de desgaste} + \text{Costo HH} + \text{Costos de transporte}$$

1-. Costos de elementos de desgaste: Se obtiene calculando el Costo de duración en horas de cada elemento o servicio y pasarlo a periodos mensuales, considerando que los cargadores trabajan 15 horas diarios y meses uniformes de 30 días.

$$\text{Costo/Duración}(\$|Horas)(i) = \frac{\text{Costo Promedio}(i)}{\text{Duración Promedio}(i)}$$

$$\text{Costo/Duración}(\$|Mes)(i) = \text{Costo/Duración}(\$|Horas)(i) * 15 * 30$$

2-. Costo de logística: Implica los costes de cambio de elementos y transporte, donde solo se contará con el de la herramienta de corte por su corta vida útil, para calcularlo necesitaremos los cambios mensuales, el costo HH y el del Flete.

$$\text{Costo logística}(i) = \text{CostoHH}(i) + \text{Costo Transporte}(i)$$

15.1 Cambios mensuales: Se refiere a los cambios mensuales del elemento de desgaste, y se calcula con la duración de los elementos de desgaste y dividiéndolo en las horas de operación de 30 días.

$$\text{Cambios mensuales} = \frac{\text{Duración}(i)}{15 \text{ horas} * 30 \text{ días}}$$

15.2 Costo de HH: Se calcula multiplicando los cambios mensuales por el costo de hora de operador que es \$10.200 en GM e CM y \$9000 en ATK. Además, las horas necesarias son 1.5 hora para calzas y 3 horas para cuchillas y entre dientes.

$$\text{Costo HH}(i) = \text{Cambios mensuales} * \text{valor hora}(i) * \text{horas de cambio}(i)$$

15.3 Costo de transporte: Costo de flete que se calcula por el valor de llevar elementos de desgaste a faena por los cambios mensuales de cada elemento. Se evaluará si se incluye en el costo, pues es un costo que depende del proveedor(p) y no solo del elemento(i).

$$\text{Costo Transporte}(i,j) = \text{Costo flete}(i,j) * \text{cambios mensuales}(i)$$

A13. Elementos de serie J600 y J350:

| Clase | Atacama Kozan | | | | Gabriela Mistral | | | |
|-----------------|---------------|-------|-------|------|------------------|-------|-------|------|
| | Nombre | Lugar | Talla | Kg | Nombre | Lugar | Talla | Kg |
| HD Abrasión | 9N4353 | 2 | 35 | 10,5 | 6I-6603 | 1 | 60 | 57,5 |
| HD Penetrator | 144-1358 | 2 | 35 | 12,7 | 135-9600 | 1 | 60 | 52,2 |
| Rock Penetrator | 1U3352 PT | 2 | 35 | 11 | 6I-6602 PT | 1 | 60 | 48 |
| HD Long | 9N4352 | 2 | 35 | 8,8 | 7Y-0602 | 1 | 60 | 42 |
| HD Rock Chiesel | 1U3352 RC-HD | 2 | 35 | 9,8 | - | 1 | 60 | - |
| Rock Chiesel | 1U3352 RC | 2 | 35 | 8,2 | 6I-6602 RC | 1 | 60 | 38,8 |
| Long | 1U3352 | 2 | 35 | 6,6 | 6I-6602 | 1 | 60 | 30,3 |
| Penetrator | 9J4349 | 2 | 35 | 5,8 | 7I-7609 | 1 | 60 | 29,6 |
| Short | 1U3351 | 2 | 35 | 5,5 | - | 1 | 60 | - |

Tabla 24: Tabla que muestra las calzas de la serie J, considerando tallas 60 en Gabriela Mistral y 35 en Atacama Kozan, utilizados actualmente por los cargadores (*Elaboración propia*).

