

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y DE MATERIALES
SANTIAGO – CHILE



ANÁLISIS DE BRECHAS EN FLOTA DE TRANSPORTE MEDIANTE METODOLOGÍA DE
ÁRBOL DE VALOR

Memoria de titulación presentada por
DAVID ZAMBRANO ALUL

Como requisito parcial para optar al título de
INGENIERO CIVIL DE MINAS

Profesor Guía
CARLOS HUNT RECABARREN
Co-Referente Externo
ANDRÉS MUJICA MOROVIC

Julio - 2022

RESUMEN

La productividad en la industria minera se puede definir en términos generales, como la relación del producto, expresado en unidades físicas (toneladas de material extraído), con respecto al insumo expresado en horas efectivas de trabajo. Durante el último tiempo, la productividad en las faenas mineras ha bajado. Las faenas mineras nacionales requieren más del doble de horas-hombre que la muestra internacional para mover una tonelada de material.

Uno de los procesos más relevantes dentro de la cadena productiva minera es la operación de transporte en la mina, tanto por su influencia en el tiempo total, como su influencia en el costo total del proceso minero. Una mejora en el transporte significa un punto importante para considerar cuando se quiere aumentar la productividad y disminuir costos.

El objetivo de esta memoria es desarrollar una metodología de Árbol de Valor que permita analizar la gestión operativa de una flota de camiones mineros, la que permitirá analizar y valorizar las brechas operacionales de esa flota, identificando el impacto que tienen las brechas detectadas en el proceso, y así priorizar el orden de reducción de brechas.

La metodología Árbol de Valor consiste en la descomposición de parámetros de control operacional en niveles jerárquicos para identificar de manera visual y numérica las brechas existentes en un proceso. Para ello se definieron los parámetros más importantes dentro del proceso de transporte, separándolos en parámetros cuantificables y no cuantificables. Luego se construyeron niveles incorporando distintas actividades y relacionando las variables hacia la productividad diaria de la flota. Lo que busca determinar el Árbol de Valor es relacionar las distintas actividades, cuantificando las brechas respecto a un tonelaje transportado objetivo, de tal forma de priorizar según el impacto de estas actividades en el resultado final.

Se aplicó esta metodología en una mina de la industria nacional, identificando de manera rápida y eficaz los parámetros operacionales que afectan en mayor medida la productividad diaria de los camiones desde un punto vista técnico y económico. Se observó que gran parte de la brecha en el tonelaje transportado, fue provocada por una actividad en específico con más del 70% de influencia en la brecha total.

El Árbol de Valor permitió identificar de manera rápida y eficaz el impacto que generan los distintos parámetros operacionales en el KPI principal, otorgando un porcentaje de impacto a cada variable, ayudando al orden de priorización de reducción de brechas, y así lograr de manera más rápida a la producción planificada de los camiones.

La metodología de Árbol de Valor propone una solución a la problemática de la reducción de la productividad del transporte, facilitando la identificación de problemas en el proceso, y así tomar medidas rápidas que aumenten la productividad y la reducción de costos.

ABSTRACT

Productivity in the mining industry can be defined in general terms as the ratio of output, expressed in physical units (tons of material extracted), to input, expressed in effective working hours. In recent times, productivity at mining sites has declined. Domestic mining operations require more than twice as many man-hours as the international sample to move one ton of material.

One of the most relevant processes within the mining production chain is the transportation operation in the mine, both for its influence on the total time, as well as its influence on the total cost of the mining process. An improvement in transportation is an important point to consider when increasing productivity and reducing costs.

The objective of this report is to develop a Value Tree methodology to analyze the operational management of a fleet of mining trucks, which will allow to analyze and assess the operational gaps of that fleet, identifying the impact of the gaps detected in the process, and thus prioritize the order of gap reduction.

The Value Tree methodology consists of the decomposition of operational control parameters in hierarchical levels to identify the existing gaps visually and numerically in a process. To this end, the most important parameters within the transportation process were defined, separating them into quantifiable and non-quantifiable parameters. Levels were then built incorporating different activities and relating the variables to the daily productivity of the fleet. The purpose of the Value Tree is to relate the different activities by quantifying the gaps with respect to a target tonnage transported, to prioritize according to the impact of these activities on the result.

This methodology was applied in a mine of the national industry, identifying quickly and efficiently the operational parameters that most affect the daily productivity of the trucks from a technical and economic point of view. It was observed that a large part of the gap in the tonnage transported was caused by a specific activity with more than 70% of influence in the total gap.

The Value Tree allowed to quickly and effectively identify the impact generated by the different operational parameters on the main KPI, giving a percentage of impact to each variable, helping to prioritize the order of gap reduction, and thus achieve the planned production of the trucks more quickly.

The Value Tree methodology proposes a solution to the problem of reduced transportation productivity, facilitating the identification of problems in the process, and thus taking quick measures to increase productivity and reduce costs.

Índice

1.	Presentación del tema	8
1.1	Introducción	8
1.2	Objetivos	9
1.2.1	Objetivo General	9
1.2.2	Objetivos Específicos	9
1.3	Alcances	9
2.	Bases del estudio	10
2.1	Minería a Cielo Abierto	10
2.1.1	Minería en Chile	11
2.2	Operaciones Unitarias	12
2.2.1	Carguío	13
2.2.2	Transporte	15
2.3	Norma ASARCO	20
2.4	Parámetros Operacionales	23
2.4.1	Productividad	24
2.4.2	Benchmark de Parámetros Operacionales	26
3.	Metodología Árbol de Valor	28
3.1	Bases de la Metodología Árbol de Valor	28
3.1.1	Árbol de Decisión	28
3.1.2	Árbol Impulsor de Valor	29
3.2	Definición de Parámetros	30
3.2.1	Payload	31
3.2.2	Tiempo de Ciclo	31
3.2.3	Tiempo Efectivo	32
3.3	Construcción de Metodología	33
4.	Desarrollo del estudio	40
4.1	Caso de Estudio	40
4.1.1	Parámetros Operacionales Planificados por Mina	40
4.2	Parámetros Operacionales Reales de Mina	43
4.3	Brechas Operacionales	49
4.3.1	Sensibilización de Resultados	61
4.4	Valorización Económica	64
4.5	Análisis de Resultados	70
5.	Conclusiones y recomendaciones	71
6.	Referencias	73

A.1 Anexo: Información relacionada a tiempos de ciclo y payload del camión	76
A.2 Anexo: Información relacionada a estados del camión	79
A.3 Anexo: Norma Asarco caso de estudio	82

Índice de Figuras

Figura 1: Ejemplo de Mina a Cielo Abierto.....	10
Figura 2: Componentes de la pala hidráulica.....	14
Figura 3: Componentes de la pala eléctrica.....	15
Figura 4: Ciclo de transporte.....	16
Figura 5: Componentes de camión minero: 1. Escalera, 2. Motor, 3. Cabina, 4. Tolva, 5. Ruedas.	17
Figura 6: Dimensiones camión Komatsu 930E-4SE.....	18
Figura 7: Ejemplo de modelo minero del sistema de administración de flotas.....	20
Figura 8: Modelo de uso de tiempo (Global Mining Guidelines Group, 2020).....	21
Figura 9: Elementos temporales básicos de camiones según GMG.....	22
Figura 10: Consumo de electricidad y combustibles por procesos en la minería del cobre.....	26
Figura 11: Información benchmark sobre parámetros de disponibilidad, UEBD y eficiencia promedio de la industria nacional e internacional.....	26
Figura 12: Ejemplo de diagrama de árbol de decisión.....	29
Figura 13: Ejemplo de árbol impulsor de valor.....	30
Figura 14: Primer nivel del Árbol de Valor.....	34
Figura 15: Segundo nivel de Árbol de Valor.....	35
Figura 16: Tercer nivel de Árbol de Valor.....	36
Figura 17: Ejemplo del primer nivel del Árbol de Valor.....	37
Figura 18: Ejemplo de estructura final del primer nivel del Árbol de Valor.....	39
Figura 19: Distancia planificada para la flota Komatsu 930E-4SE.....	41
Figura 20: Velocidad vacío y cargado para la flota Komatsu 930E-4SE.....	41
Figura 21: Tiempo de ciclo planificado para la flota Komatsu 930E-4SE.....	42
Figura 22: Tiempo de viaje vacío y cargado planificado para la flota Komatsu 930E-4SE.....	42
Figura 23: Modelo de uso de tiempo resultante a partir de los parámetros de estados planificados para la flota de Komatsu 930E4-SE.....	43
Figura 24: Payload mensual para la flota de Komatsu 930E-4SE.....	44
Figura 25: Distancia recorrida mensual para la flota de Komatsu 930E-4SE.....	44
Figura 26: Velocidad vacío y cargado mensual para la flota de Komatsu 930E-4SE.....	45
Figura 27: Tiempo de ciclo efectivo mensual para la flota de Komatsu 930E-4SE.....	45
Figura 28: Desglose del tiempo de ciclo efectivo de la flota Komatsu 930E-4SE para los periodos de análisis.....	46
Figura 29: Horas efectivas, disponibilidad y UEBD de la flota Komatsu 930E4-SE para el periodo de análisis.....	46
Figura 30: Fuera de servicio mensual para la flota de Komatsu 930E-4SE.....	47
Figura 31: Pérdida operacional mensual para la flota de Komatsu 930E-4SE.....	47
Figura 32: Demora mensual para la flota de Komatsu 930E-4SE.....	48
Figura 33: Reserva mensual para la flota de Komatsu 930E-4SE.....	48
Figura 34: Modelo de uso de tiempo resultante a partir de los parámetros de estados del mes de enero de 2021 para la flota de Komatsu 930E4-SE.....	49
Figura 35: Primer nivel de Árbol de Valor.....	50

Figura 36: Segundo nivel de Árbol de Valor. Desglose del tiempo de ciclo efectivo.	51
Figura 37: Segundo nivel de Árbol de Valor. Desglose del tiempo efectivo.	52
Figura 38: Tercer nivel de Árbol de Valor. Desglose del tiempo de viaje vacío y cargado.....	53
Figura 39: Tercer nivel de Árbol de Valor. Desglose de disponibilidad y UEBD.	54
Figura 40: Estructura final de Árbol de Valor para el caso de estudio.....	55
Figura 41: Estructura final de Árbol de Valor donde se detalla el impacto de cada parámetro operativo en el tonelaje transportado al día por camión.....	60
Figura 42: Estructura final de Árbol de Valor relacionado al costo por tonelada, donde se detalla el impacto de cada parámetro operativo en el costo por tonelada.	69
Figura 43: Modelo de uso de tiempo utilizados por mina en estudio.	82
Figura 44: Elementos temporales básicos para camiones utilizados por mina en estudio.	83

Índice de Tablas

Tabla 1: Producción de cobre de minas a cielo abierto destacadas en Chile en 2020.	11
Tabla 2: Desglose de parámetros principales en parámetros cuantificables y no cuantificables.	35
Tabla 3: Valores ejemplo para parámetros operacionales del primer nivel del Árbol de Valor.	37
Tabla 4: Modelos y cantidad de camiones presentes en la mina.	40
Tabla 5: Parámetros de tiempo planificados para la flota de Komatsu 930E4-SE.	42
Tabla 6: Parámetros de estado planificados para la flota de Komatsu 930E4-SE.....	43
Tabla 7: Impacto generado en el tonelaje transportado por parámetros operacionales del primer nivel del Árbol de Valor.....	57
Tabla 8: Impacto generado en el tonelaje transportado por la variación de parámetros operacionales del segundo nivel del Árbol de Valor relacionados al tiempo de ciclo.....	57
Tabla 9: Impacto generado en el tonelaje transportado por la variación de parámetros operacionales del segundo nivel del Árbol de Valor relacionados al tiempo efectivo.	58
Tabla 10: Impacto generado en el tonelaje transportado por la variación de parámetros operacionales del tercer nivel del Árbol de Valor relacionados al tiempo de viaje vacío y cargado.	58
Tabla 11: Impacto generado en el tonelaje transportado por la variación de parámetros operacionales del tercer nivel del Árbol de Valor relacionados a la disponibilidad y al UEBD... ..	59
Tabla 12: Impacto generado en el tonelaje transportado por parámetros del primer nivel del Árbol de valor al realizar una variación sensibilizada.	61
Tabla 13: Impacto generado en el tonelaje transportado por la variación de parámetros operacionales del segundo nivel del Árbol de Valor relacionados al tiempo de ciclo al realizar una variación sensibilizada.....	62
Tabla 14: Impacto generado en el tonelaje transportado por la variación de parámetros operacionales del segundo nivel del Árbol de Valor relacionados al tiempo efectivo al realizar una variación sensibilizada.....	62
Tabla 15: Impacto generado en el tonelaje transportado por la variación de parámetros operacionales del tercer nivel del Árbol de Valor relacionados al tiempo de viaje vacío y cargado al realizar una variación sensibilizada.	63
Tabla 16: Impacto generado en el tonelaje transportado por la variación de parámetros operacionales del tercer nivel del Árbol de Valor relacionados a la disponibilidad y al UEBD al realizar una variación sensibilizada.....	63
Tabla 17: Impacto generado en el costo por tonelada por parámetros operacionales del primer nivel del Árbol de Valor.	66

Tabla 18: Impacto generado en el costo por tonelada por la variación de parámetros operacionales del segundo nivel del Árbol de Valor relacionados al tiempo de ciclo.	66
Tabla 19: Impacto generado en el costo por tonelada por la variación de parámetros operacionales del segundo nivel del Árbol de Valor relacionados al tiempo efectivo.	67
Tabla 20: Impacto generado en el costo por tonelada por la variación de parámetros operacionales del tercer nivel del Árbol de Valor relacionados al tiempo de viaje vacío y cargado.	67
Tabla 21: Impacto generado en el costo por tonelada por la variación de parámetros operacionales del tercer nivel del Árbol de Valor relacionados a la disponibilidad y al UEBD...	68
Tabla 22: Extracto de información relacionada a tiempos de ciclo y payload del camión proveniente del sistema de administración de flotas, donde se observa de izquierda a derecha datos de fecha, turno código camión y modelo, código pala y modelo, origen, material movido y destino.....	76
Tabla 23: Extracto de información relacionada a tiempos de ciclo y payload del camión proveniente del sistema de administración de flotas, donde se observa de izquierda a derecha datos de nombre y apellido de operador de camión y pala, contabilización de carga exitosa, contabilización del ciclo realizado, tonelaje teórico que debiese cargar el camión y el tonelaje teórico que debiese cargar el camión.....	77
Tabla 24: Extracto de información relacionada a tiempos de ciclo y payload del camión proveniente del sistema de administración de flotas, donde se observa de izquierda a derecha datos de distancia recorrida vacío y cargado, tiempo de viaje vacío, tiempo de cola en carga, tiempo de acuatamiento en carga, tiempo de viaje cargado, tiempo de cola en descarga, tiempo de acuatamiento en descarga y tiempo de descarga.....	78
Tabla 25: Extracto de información relacionada a estados del camión proveniente del sistema de administración de flotas, donde se observa de izquierda a derecha datos de año, mes, día, fecha, turno, tipo de equipo, grupo de flota, flota y código de equipo.	79
Tabla 26: Extracto de información relacionada a estados del camión proveniente del sistema de administración de flotas, donde se observa de izquierda a derecha datos de horas efectivas, pérdidas operacionales, demoras, reservas no programadas, reservas programadas, fuera de servicio, horas operativas, horas disponibles y horas nominales del turno.	80
Tabla 27: Extracto de información relacionada a estados del camión proveniente del sistema de administración de flotas, donde se observa de izquierda a derecha datos de toneladas transportadas por camión en el turno, total de vueltas realizadas por camión, distancia de subida, distancia de bajada, distancia horizontal y distancia total recorrida	81

1. PRESENTACIÓN DEL TEMA

1.1 Introducción

La minería del cobre ha sido históricamente un actor fundamental en la economía y desarrollo de Chile, en términos de su contribución al Producto Interno Bruto (PIB), ingresos fiscales, exportaciones, empleo y atracción de inversiones. La contribución que la minería aporta depende en gran medida de la rentabilidad operacional de las empresas del sector, principalmente de la diferencia entre el precio del cobre y sus costos de producción. Por esta razón controlar y mejorar la productividad de la industria y, en consecuencia, sus costos resultan relevantes para las compañías mineras, y para el país en su conjunto. (Comisión Nacional de Productividad, 2017).

La productividad en la industria minera se puede definir, en términos generales, como la relación del producto, expresado en unidades físicas (toneladas de material extraído), con respecto al insumo, expresado en horas efectivas de trabajo (Salomón, Ortiz, & Cordero, 2018). Existen factores naturales que afectan negativamente a la productividad, como la disminución en las leyes de mineral y la creciente profundización de los depósitos. A través de cálculos de la Productividad Total de Factores (PTF) y corrigiendo por factores geológicos (ley de cobre), la Comisión Nacional de Productividad, estimó una disminución de 1% anual de la PTF entre período 2000-2014 (Comisión Nacional de Productividad, 2017). Utilizando una metodología similar la Comisión Chilena del Cobre estimó una disminución de 1,5% anual de la PTF durante el período 2004-2019 (Comisión Chilena del Cobre, 2021).

La diferencia entre las faenas con mejores prácticas a nivel mundial para mover mil toneladas de material (30 horas-hombre) versus el promedio nacional (67 horas-hombre) corresponde a 37 horas-hombre, es decir, en promedio las faenas de la muestra nacional requirieron más del doble de horas-hombre que la muestra internacional para ejecutar la misma labor durante el año 2015 (Comisión Nacional de Productividad, 2017).

Si bien las razones de estas diferencias son amplias, gran parte se deben a razones propias de la faena. Existen importantes diferencias entre las faenas chilenas y las faenas internacionales de mejores prácticas, donde a modo de ejemplo, la operación de transporte en la muestra internacional utiliza los equipos un 10% adicional de horas al día. (Comisión Nacional de Productividad, 2017).

Teniendo en cuenta lo anterior, la gestión interna de las propias faenas es un punto importante para considerar cuando se quiere aumentar la productividad.

La presente memoria de título centrará su análisis en la operación de transporte, esto debido a ser una operación que representa cerca del 50% del costo mina, por lo que medir y controlar la productividad de las flotas de transporte toma mayor relevancia para los objetivos de este estudio. Para lo anterior, se desarrollará una metodología de Árbol de Valor que permita analizar la gestión operativa de una flota de camiones mineros, la cual permitirá analizar y valorizar las brechas operacionales de esa flota, identificando y priorizando el impacto que tienen las brechas detectadas en el proceso. Para ello se determinarán los parámetros operacionales más influyentes en el proceso de transporte, relacionados a tiempo y a actividades realizadas por los camiones.

La metodología será evaluada en una mina a cielo abierto real de la industria nacional, que permitirá identificar las brechas operacionales en el proceso de transporte de camiones mineros de dicha faena, para así realizar una valorización técnico-económica que permita identificar el

impacto que tienen las brechas detectadas en el proceso, concluir respecto a esto y entregar recomendaciones pertinentes al caso.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

Analizar la gestión operativa de una flota de camiones para identificar el impacto que generan las brechas detectadas en los parámetros operacionales de los camiones en el proceso, para lo cual se desarrollará una metodología de Árbol de Valor que permita una evaluación desde una perspectiva técnica y económica.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Analizar tiempos no efectivos de una flota de camiones de la clase 290 toneladas.
- Analizar actividades del ciclo de transporte de una flota de camiones de la clase 290 toneladas.
- Realizar una valorización técnico-económica de una flota de camiones de la clase 290 toneladas según brechas operacionales identificadas.

1.3 Alcances

La presente memoria de título se basará en información proveniente una mina a cielo abierto real de la industria nacional, cuyo nombre debe permanecer confidencial. Se cuenta con información proveniente del sistema de administración de flotas, específicamente información relacionada al *payload*¹, tiempos y estados de la flota de camiones, en un rango de tiempo de seis meses, desde enero a junio de 2021.

El análisis contempla las siguientes consideraciones:

- El análisis se basa en una mina a cielo abierto.
- La flota de transporte a analizar serán camiones de alto tonelaje de la clase 290 toneladas, específicamente la flota de camiones Komatsu 930E4-SE.
- La información proveniente del sistema de administración de flotas de los camiones Komatsu 930E4-SE será analizada y comparada con la información planificada por la faena minera, para así detectar brechas operacionales asociadas a la productividad.
- La información asociada a costos operacionales utilizada estará basada en el presupuesto de la mina en estudio.

¹ Capacidad de carga útil.

2. BASES DEL ESTUDIO

2.1 Minería a Cielo Abierto

La minería a cielo abierto se puede definir como el proceso de excavación de los depósitos que se encuentran cercanos a la superficie. Comúnmente son de forma cónica (depende de la forma del yacimiento), se construyen con una serie de mantos concéntricos divididos por el acceso a la mina y las vías de acarreo que descienden desde la superficie de la mina hasta el fondo de esta en forma de espiral o zigzag. Esta excavación se realiza mediante cortes horizontales en el yacimiento, usando uno o más bancos horizontales de explotación que permiten extraer el mineral.

El inicio de la excavación consiste en remover la capa de cobertura formada por roca residual de material consolidado y no consolidado, denominado estéril, la que debe eliminarse para dejar al descubierto la zona mineralizada y comenzar a producir. La capa de cobertura, una vez extraída, es depositada en botaderos que se ubican fuera de los límites del rajo, mientras que el mineral es llevado a las plantas de producción o zonas de acopio (también denominados stocks). (Henríquez, 2019).

El método de extracción a cielo abierto es de bajo costo operacional y moderadamente selectivo, ya que posee la flexibilidad de decidir si el mineral extraído será procesado, enviado a acopios o será enviado a botaderos. Las técnicas de remoción de material son cíclicas, con fases de extracción (perforación, voladura y carga) y transporte. Esto es especialmente válido en terrenos de recubrimiento de roca dura que deben ser previamente perforados y barrenados (Henríquez, 2019).

Un factor importante que se debe considerar es la relación entre la parte de roca residual y la parte de mineral excavado denominado razón estéril/mineral. En operaciones importantes esta relación suele estar comprendida entre 2:1 y 4:1. Las relaciones superiores a 6:1 tienden a ser menos viables desde el punto de vista económico (dependiendo del mineral a extraer). (R. Armstrong & Menon, 2012).



Figura 1: Ejemplo de Mina a Cielo Abierto.

El principal objetivo económico de las minas a cielo abierto es extraer la cantidad mínima de material y obtener una máxima recuperación de la inversión, procesando el producto mineral más comercializable.

Para minimizar las inversiones de capital y acceder al mismo tiempo al material de mayor valor dentro de un yacimiento, hay que desarrollar un plan de explotación que detalle de forma precisa el método de extracción y de tratamiento del mineral.

Dado que muchos yacimientos no presentan una disposición uniforme, antes de elaborar el plan de explotación de la mina es necesario emprender amplias perforaciones exploratorias, conocidas como sondaje, para perfilar la geología y localizar el mineral. La forma del yacimiento definirá el tamaño y el diseño de la mina, la cual dependerá de la mineralogía y la geología de la zona (R. Armstrong & Menon, 2012).

Para determinar el material que vamos a extraer en la explotación de una mina a rajo abierto, y en qué secuencia, se utilizan herramientas computacionales que analizan el “Modelo de Recursos”, que es una idealización de todo el yacimiento dividido en bloques de igual tamaño en 3D (cada bloque contiene toda la información necesaria), que se obtiene a partir de la información obtenida de sondajes, estudios metalúrgicos, modelos geológicos, estudios geotécnicos, hidrológicos, geofísicos, etc., que se hayan hecho previamente y que permitan contar con este modelo lo más cercano a la realidad que sea posible.

El plan de explotación es el producto final de todo el proceso de planificación, el cual incluye el programa de producción, la proyección de los costos de operación, las infraestructuras (de almacenamiento, oficinas, mantenimiento, etc.), el transporte, las necesidades de equipos y/o la renovación de estos, y el ritmo de explotación que repercuten en el período de vida útil de la mina, que concluye con el agotamiento del mineral o con el cumplimiento de un límite económico (Optimización del rajo: qué es y cómo se hace, 2012).

2.1.1 Minería en Chile

En Chile la participación en producción de la minería a cielo abierto se ha mantenido en los últimos ocho años, donde esta ha tenido participaciones entre 86,6% (2011) a 88,6% (2013). Para los próximos años se observa un máximo de participación de la minería a cielo abierto de 89,4% para el año 2018 y un mínimo de participación de la minería a cielo abierto de 88,2% hacia el año 2022 (Comisión Chilena del Cobre, 2018).

Dentro de las minas a cielo abierto destacadas en Chile se encuentran (Consejo Minero, 2022):

Tabla 1: Producción de cobre de minas a cielo abierto destacadas en Chile en 2020.

<i>Mina</i>	<i>[KTMF]²</i>
<i>Escondida</i>	1.187
<i>Doña Inés de Collahuasi</i>	629
<i>División Chuquicamata</i>	401

² Miles de toneladas métricas finas.

2.2 Operaciones Unitarias

Las actividades de producción pueden ser separadas en operaciones unitarias independientes, que realizadas en cierta secuencia permiten la explotación y el desarrollo de un depósito. Dichas operaciones son: perforación, tronadura, carguío, transporte y chancado.

La perforación es la operación inicial del proceso productivo en una faena minera. Consiste en abrir huecos (pozos o tiros de perforación) en el macizo rocoso, con una distribución y geometría adecuada, en donde se dispondrán cargas explosivas, que fragmentarán y separarán los minerales de la corteza terrestre.

Esta operación cumple un papel muy importante para la operación posterior, ya que, si los tiros no cumplen las especificaciones necesarias, se aumenta la probabilidad de fracaso en la calidad de la tronadura, lo que puede desencadenar un grave problema en cuanto a operación, costos y producción.

La tronadura es la siguiente operación, siendo este el primer proceso de conminución que se aplica al material. Consiste en cargar con explosivos los tiros generados en la perforación, con el objetivo de fracturar y remover el material requerido por el programa de producción, a unas granulometrías manejables por los equipos mineros.

El costo de la perforación y tronadura dependerá de varios factores, entre ellos: dureza de la roca, presencia de estructuras geológicas, mantenimiento de los equipos, insumos necesarios, ejecución por parte de los operadores, entre otros. Alcanzando un costo que fluctúa entre 20% a un 30% del costo de la operación de la mina.

La siguiente operación es la de carguío y transporte, la que tiene como objetivo retirar el material tronado de la frente y cargar el material en el sistema de transporte de la faena, para ser transportado al lugar de destino correspondiente.

Para materializar esta actividad es necesario ejecutar la siguiente secuencia de actividades:

- Preparación de la zona de trabajo.
- Posicionamiento de equipos.
- Retirar el material tronado desde el frente de trabajo (Carguío).
- Traspaso del material al equipo de transporte dispuesto para el traslado.
- Transporte del material a su lugar de destino (Chancador, stock, botaderos).
- Descarga del material.
- Retorno del equipo de transporte al punto de carguío.

El costo asociado a la operación de carguío y transporte alcanza un costo que fluctúa entre 45% a un 65% del costo de la operación de la mina, lo que se debe a la cantidad de equipos involucrados, al alto grado de mecanización, al menor rendimiento productivo por equipo y a su operación prácticamente continua. Esto hace necesario garantizar un ambiente de operación apto que permita lograr los mejores rendimientos de los equipos involucrados.

Finalmente sigue la operación de chancado, que tiene como principal objetivo el reducir el tamaño del material para facilitar el transporte y el tratamiento, respecto a las operaciones físicas y a las reacciones químicas. Para lograr este objetivo, antes de que el material se lleve al chancado, se recomienda realizar un harneado o selección del tamaño previo, segmentando en diferentes granulometrías. Así es posible aumentar la capacidad del equipo, evitar las dificultades que provocan los finos (atascos), y la reducción del consumo de energía.

Generalmente es una operación seca (sin adición de agua), la que se efectúa en dos etapas: Chancado primario o grueso y chancado fino (comprende las etapas de chancado secundario, terciario y cuaternario) (Apunte de minería a cielo abierto, s.f.), (Rojas, 2009).

2.2.1 Carguío

La operación de carguío comienza una vez que el material ha sido tronado y la zona se ha revisado para verificar que la operación se realice de manera segura (se buscan tiros quedados, rocas muy grandes, derrumbes, cuñas, etc.). Posterior a eso se recurre a los equipos de apoyo, tales como bulldozers, wheeldozeres, cargadores de servicio, camiones de riego, para dejar expedito y utilizable el sector de operación. Una vez completado esto, los equipos de carguío con su correspondiente flota de equipos de transporte se posicionan en el lugar para iniciar la operación (González, 2017)

Fundamentalmente lo que se hace es extraer el material tronado desde el lugar de operación por el equipo de carguío, para luego ser depositado en el equipo de transporte, lo cual se logra posicionando el equipo frente al material cargado. El equipo de carguío recoge el material tronado con su balde y lo desplaza hacia el punto de descarga, donde el balde es vaciado sobre la tolva del equipo de transporte. Esto se repite hasta que el equipo de transporte alcance su llenado operacional y sea reemplazado por otro equipo de transporte para continuar cíclicamente hasta agotar el material del frente de trabajo (Rojas, 2009).

El ciclo carguío se divide en cuatro fases: excavación, giro, vaciado y retorno. En cada ciclo de trabajo se utilizan tres movimientos principales: empuje, levante y giro (Bahamóndez, 2017):

1. **Fase de excavación:** Consiste en empujar el balde hacia el banco, levantar el balde para llenarlo y retraer el balde del banco. Un balance adecuado de las fuerzas de empuje y levante es esencial para una excavación eficaz y productiva.
2. **Fase de giro:** Esta fase comienza cuando el balde se encuentra totalmente cargado. Durante esta fase, el operador controla la posición horizontal del balde mediante una trayectoria de giro y con una altura controlada de descarga, permite girar el balde y posicionarlo sobre el camión.
3. **Fase de vaciado:** Comienza antes de que el balde cargado pase sobre la tolva del camión y termina cuando el movimiento de giro para y retrocede para regresar el balde al banco. Durante la fase de vaciado, el operador abre la tapa del balde, para descargar el material mientras controla la altura de descarga evitando lesiones al personal de la mina y evitar dañar la tolva del camión, esencialmente durante la primera carga.
4. **Fase de retorno:** Comienza cuando se inicia el giro del balde de regreso al banco y continúa bajando el balde en posición retraída para cerrar la tapa de esta, activando el seguro de cierre de la tapa del balde.

El ciclo completo considera, además del ciclo de carguío, el tiempo de espera de camión (tiempo que la pala debe esperar hasta que un camión llegue a la frente de carguío y se posicione) (Bonzi, 2016).

Esto queda representado según las siguientes ecuaciones:

$$\text{Tiempo de Ciclo de Carguío} = T. \text{Carguío} + T. \text{Espera} \quad (2.1)$$

$$\text{Tiempo de Carguío} = \text{Tiempo de Baldada} \times \text{Número de Pases} \quad (2.2)$$

Donde:

1. **Tiempo de ciclo de carguío:** corresponde al tiempo que demora el equipo de carguío en cargar un camión, considerando el tiempo de espera y llegada de camión al frente de carguío.
2. **Tiempo de carguío:** corresponde al tiempo que demora el equipo de carguío en cargar un camión.
3. **Tiempo de baldada:** corresponde al tiempo que demora el equipo de carguío en realizar la secuencia unitaria de carguío representada por las fases de “excavación”, “giro”, “vaciado” y “retorno”.
4. **Número de pases:** cantidad de veces que realiza la secuencia de carguío.

I. Equipos de carguío

La operación de carguío para el caso de las minas a cielo abierto, como se mencionó en secciones anteriores, requiere de grandes equipos debido a los grandes volúmenes de material que deben mover a diario con tal de obtener el mejor beneficio de la extracción de mineral. Entre estos equipos encontramos las palas hidráulicas y las palas eléctricas (González, 2017)

Palas hidráulicas

Son equipos especialmente diseñados para las operaciones de excavación a cielo abierto que están formado principalmente por un brazo hidráulico con un balde en su extremo, destinada a desplazarse sobre orugas, con la capacidad de girar 360° sobre su propio eje. Los componentes de este equipo pueden visualizarse en la Figura 2.

Estos equipos tienen capacidades que pueden llegar cercano a las 60 yd^3 (González, 2017), como por ejemplo las palas hidráulicas Komatsu PC8000 con capacidades de 55 yd^3 (Komatsu, 2016) y la CAT 6060 con capacidades de 44,5 yd^3 (Caterpillar, 2014).

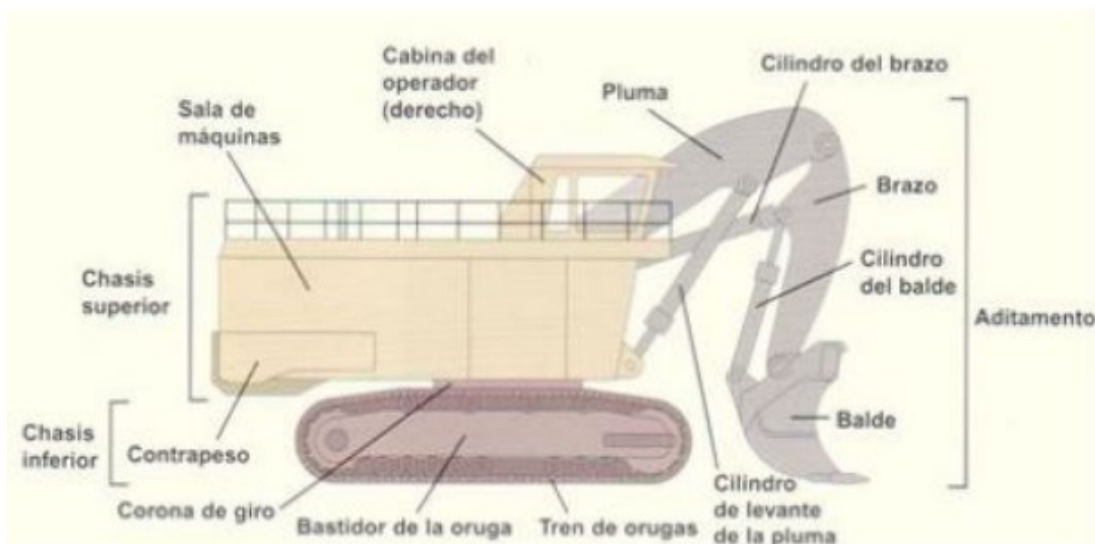


Figura 2: Componentes de la pala hidráulica.

Palas eléctricas

También conocidas como palas de cable, son un tipo de excavadora de cable, donde el brazo de excavación está controlado y accionado por tornos y cuerdas de acero, en lugar de sistemas hidráulicos como en las palas hidráulicas más comunes. Los componentes de este equipo pueden visualizarse en la Figura 3.

Las palas eléctricas requieren de un cable de alimentación, el cual debe resistir las condiciones extremas con las que se trabaja en minería (González, 2017).

Estos equipos tienen capacidades que pueden llegar cercano a las 90 yd^3 (González, 2017), como por ejemplo las palas eléctricas Komatsu 4100XPC con capacidades de 88 yd^3 (Joy Global, 2016)

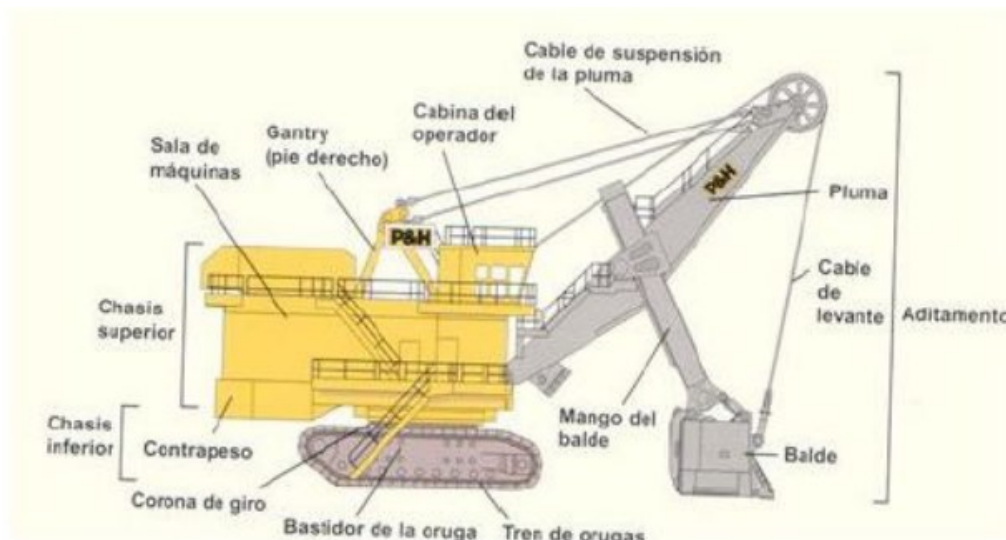


Figura 3: Componentes de la pala eléctrica.

II. Selección de equipo de carguío

Dentro de las consideraciones que deben tomarse al seleccionar un equipo de carguío se encuentra (González, 2017):

- Selectividad.
- Altura de banco.
- Compatibilidad con equipos de transporte.
- Productividad.
- Flexibilidad.
- Confiabilidad.
- Costo de adquisición.
- Mantención.

2.2.2 Transporte

Los equipos de transporte tienen por principal función desplazar el material extraído por el equipo de carguío hacia un punto de descarga (botaderos, stocks, chancado) de manera segura y eficiente cumpliendo los requerimientos de producción. Pueden tener un camino fijo (tren, por ejemplo) o bien pueden desplazarse libremente por cualquier camino, como es el caso de los camiones, los cuales serán el objetivo de análisis en el presente trabajo (Rojas, 2009).

Fundamentalmente lo que se hace es posicionar el camión en el punto de carga de material, donde la pala descarga material sobre la tolva del camión hasta alcanzar su llenado operacional, para luego ser asignado hacia un punto de descarga de material. Esta secuencia se repite hasta que haya sido retirado el material requerido del frente de trabajo (Apunte de minería a cielo abierto, s.f.).

Este ciclo queda detallado a continuación y es representado en la Figura 4 (Callejas, 2020):

1. **Viajando:** tiempo en que el camión se dirige al frente de carguío.
2. **Esperando:** tiempo en que el camión espera fuera de la zona de carga a otros camiones terminar su ciclo de carga.
3. **Cuadrando o aculatando en carga:** tiempo donde el operador debe maniobrar el equipo y posicionarse para recibir el material de la pala.
4. **Cargando:** tiempo donde camión espera que el equipo de carguío vacíe material sobre su tolva hasta su totalidad.
5. **Acarreando o transportando:** tiempo en que el camión se dirige a su destino de descarga.
6. **Cola:** tiempo en que el camión espera fuera de la zona de descarga a otros camiones terminar su ciclo de descarga.
7. **Retrocediendo o aculatando en descarga:** tiempo donde el operador debe maniobrar el equipo y posicionarse para descargar el material en su destino.
8. **Descargando:** tiempo que le toma al camión el levantar la tolva y descargar el mineral sobre su destino hasta que baje la tolva a su posición inicial. La descarga puede efectuarse en chancado (en caso de que sea mineral), en stocks (mineral estratégico) o en botaderos (estéril).

Esto queda representado según la siguiente ecuación:

$$\text{Tiempo de Ciclo} = T.Viajando + T.Esperando + T.Cuadrando + T.Cargando + T.Acarreando + T.Cola + T.Retrocediendo + T.Descargando \quad (2.3)$$

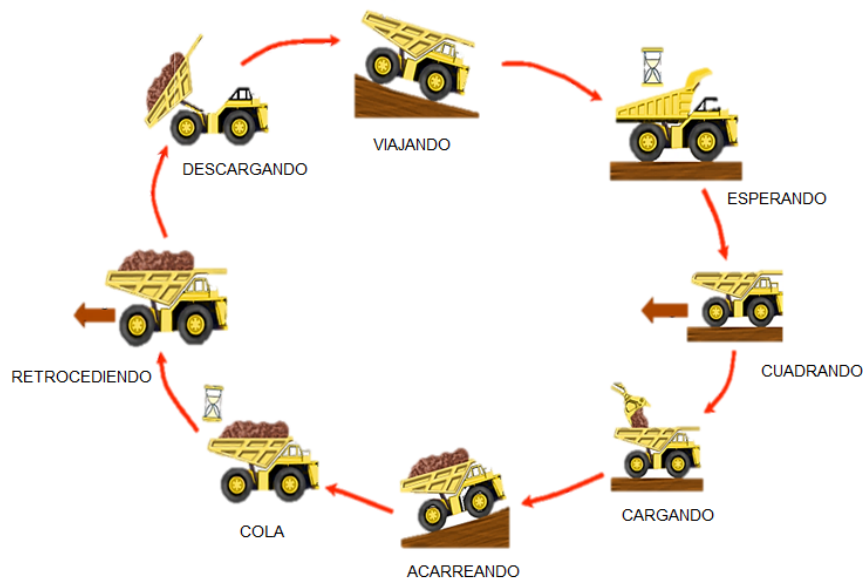


Figura 4: Ciclo de transporte.

I. Equipos de Transporte

La operación de transporte requiere de grandes equipos debido a los grandes volúmenes de material que se deben mover a diario con tal de obtener el mejor beneficio de la extracción de mineral. La unidad de transporte más utilizada corresponde a los camiones mineros convencionales, los cuales están especialmente diseñados para acarrear grandes tonelajes. Estos vehículos pueden alcanzar fácilmente los 13 metros de largo, 8 metros de ancho y 8 metros de alto, tamaño que les permite transportar grandes cargas de material, siendo los camiones de mayores dimensiones los que alcanzan capacidades de carga sobre las 360 toneladas por ciclo

de transporte. A continuación, se presenta de manera general los componentes de estos camiones, tomando como ejemplo el modelo de camión Komatsu 930E-4SE (Komatsu, 2012).



Figura 5: Componentes de camión minero: 1. Escalera, 2. Motor, 3. Cabina, 4. Tolva, 5. Ruedas.

Según datos del Catastro de Equipamiento Minero 2019-2020, la cual considera los equipos más relevantes usados en las faenas mineras a rajo abierto y subterráneas, la participación de mercado de los camiones grandes fuera de carretera (sobre 50 toneladas de capacidad) se distribuye de la siguiente forma: Caterpillar 49%, Komatsu 48% y Liebherr 3% aproximadamente (Editec S.A, 2020).

Dentro de estos equipos encontramos camiones pertenecientes a la clase 360 toneladas, como Caterpillar 797F con capacidad de carga útil nominal de 363 toneladas métricas y velocidad máxima cargado que alcanza los 67,6 km/h (Caterpillar, 2012), Komatsu 980E-5 con capacidad de carga útil nominal de 363 toneladas y velocidad máxima cargado que alcanza los 64 km/h (Komatsu, 2017), y Liebherr T282b con capacidad de carga útil nominal de 363 toneladas y velocidad máxima cargado que alcanza los 64 km/h (Liebherr Mining Equipment Co, 2007), y camiones pertenecientes a la clase 290 toneladas, como Komatsu 930E-4SE con capacidad de carga útil nominal de 292 toneladas métricas y velocidad máxima cargado que alcanza los 64,5 km/h (Komatsu, 2012).

A continuación, se presenta a modo de ejemplo las dimensiones del camión Komatsu 930E-4SE:

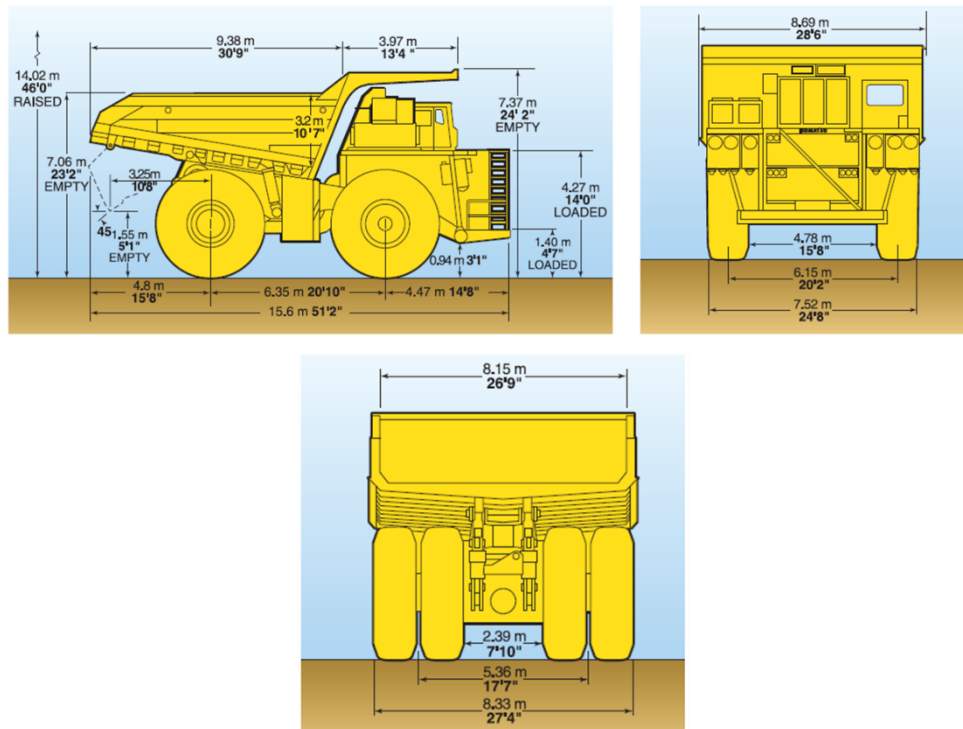


Figura 6: Dimensiones camión Komatsu 930E-4SE.

II. Compatibilidad de equipos de carguío y transporte

En la explotación de un yacimiento, y desde el punto de vista de eficiencia y optimización de rendimiento y recursos, el dimensionamiento de los equipos de carguío y transporte resulta muy importante, no sólo en número y tipo de equipos de la flota, también en características y compatibilidad entre ellos. En función de esto se definen las mejores alternativas de diseño de la flota para cierto proyecto, las que deben cumplir con lo siguiente (Rojas, 2009):

- Compatibilidad física de los equipos de carguío y transporte con la explotación, es decir que la flota de equipos sea capaz de operar en la faena en condiciones normales de operación y seguridad (en función de la altura de bancos, dimensiones operacionales, selectividad, etc.).
- Compatibilidad física entre el equipo de carguío y el de transporte, es decir que el equipo de carguío sea capaz de operar en conjunto con el equipo de transporte (altura de descarga del carguío v/s altura de carga del transporte, match pala/camión, etc.).

III. Sistema de administración de flotas

El sistema de administración de flotas es una herramienta que busca optimizar la asignación de camiones a palas y/o destinos, maximizando la utilización del tiempo y minimizando las pérdidas, en tiempo real. Dentro de sus objetivos se encuentran (Bonzi, 2016):

- Automatizar y optimizar asignaciones de camiones.
- Almacenar información operacional respecto a los equipos de carguío, transporte o equipos auxiliares, según el tipo de equipo, flota y temporalidad requerida.
- Recopilar datos de mantenimiento.
- Reportabilidad propia.
- Asignación de combustible automáticamente.
- Aumentar productividad.
- Reducir costos de operación.

El sistema registra los tiempos claves de cada ciclo de transporte, transmisión instantánea de datos y posterior decodificación, utilizando la información que los operadores registran en su panel. Éste logra registrar, guardar y procesar una gran cantidad de información para entregar a la mina una productividad mejorada y una eficiencia aumentada a través de una probada optimización de flota. Las operaciones básicas del sistema son:

1. Registro de eventos de ciclo de transporte de material relevante para la empresa.
2. Traspaso de los datos en tiempo real y posterior decodificación.
3. Registro de datos y almacenamiento de información.
4. Proceso de datos y gestión de asignación de camiones a destino de manera óptima.
5. Envío de asignación al camión respectivo para la realización de ruta óptima.

El modelo minero del sistema de administración de flotas consta de varios conceptos, los cuales están configurados de tal manera en el modelo que procese y optimice la gran cantidad de información y de variables para entregar la mejor asignación a los equipos. Dicho sistema se configura de acuerdo con el siguiente modelo (Bonzi, 2016):

- **Mina:** ubicación geográfica en el espacio que está siendo explotada
- **Pit:** lugar físico de explotación, donde se encuentran los equipos operando.
- **Región:** Son los distintos sectores del pit de manera de puntualizar la operación en sectores específicos.
- **Punto de Carga:** punto demarcado con coordenadas espaciales, donde se encuentra la operación de carga dentro del pit. Por lo general son ubicaciones de los equipos de carguío.
- **Punto de Descarga:** punto demarcado con coordenadas espaciales, donde se encuentra la operación de descarga dentro del pit. Generalmente son ubicaciones correspondientes a botaderos, stocks y/o chancados.
- **Nodos Intermedios:** son puntos virtuales en el sistema, definidos por coordenadas especiales. Sirven para referenciar caminos, es decir, entre cada nodo se puede conocer la distancia y pendiente de los caminos.
- **Balizas:** son puntos virtuales dentro de las rutas de acarreo, los que incluyen los puntos de carga y descarga dentro del pit y se definen por coordenadas espaciales. Las balizas sirven para detectar los camiones de extracción en sus llegadas y/o salidas desde el origen o destino. En estos puntos, al sistema se le permite reasignar la ruta a los camiones si es que se llegase a encontrar una mejor.

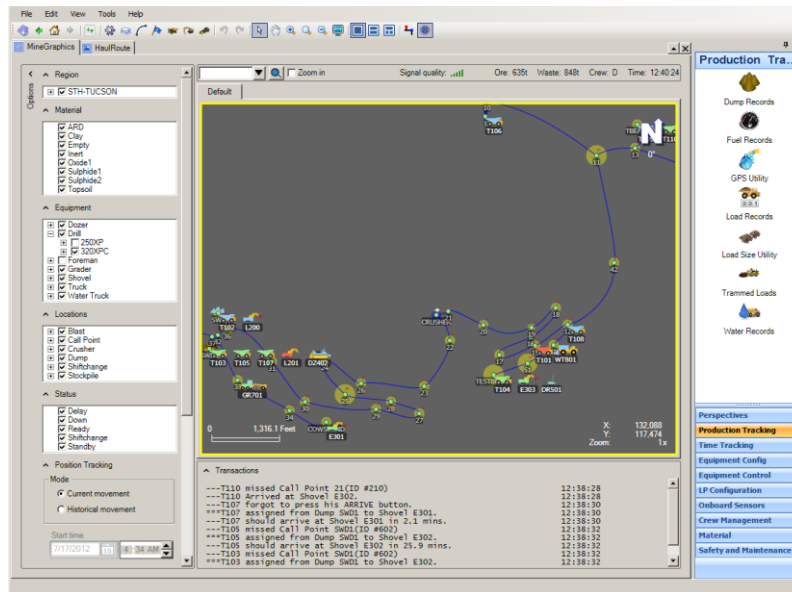


Figura 7: Ejemplo de modelo minero del sistema de administración de flotas.

Los principales datos que debe manejar el sistema son los mencionados a continuación:

- Una red de ruta de transporte que contiene cada uno de los caminos.
- Pendientes y distancias de cada uno de los caminos.
- Tiempos de viaje (históricos y en tiempo real) entre puntos de carga, descarga y balizas virtuales intermedias en ruta.
- Tiempos de maniobra y descarga en botaderos, stocks y/o chancado.
- Estatus operacionales de equipos.
- Restricciones operativas tales como prioridad de palas, capacidad de botaderos y chancado, etc.
- Ranking “Match Pala-Camión”.

Sobre la base de esta información, es donde el sistema realiza las asignaciones, mediante diferentes algoritmos.

Dentro de la data resultante más relevante que logra entregar el sistema de administración de flotas se encuentra información relacionada a:

- **Estados del equipo:** información relacionada a la Norma ASARCO de los equipos (visto en detalle más adelante).
- **Tiempos de ciclo del equipo:** en el caso de los camiones este puede dividirse en viaje vacío/cargado, carga/descarga, acuatando y espera/cola.
- **Payload:** en el caso de los camiones este se refiere a la cantidad de material que transporta en cada ciclo.

2.3 Norma ASARCO

Es de forma habitual que en la minería se tenga una forma de control y evaluación de gestión de los estatus operacionales en que se encuentran los equipos durante un período determinado a evaluar. Para ello, es normal que en la minería se utilice la escala de tiempos según la Norma ASARCO, que rige la operación en sí. Esta norma clasifica y describe en detalle cada uno de los estatus en que se encuentran los equipos en operación durante un período determinado de tiempo, permitiendo tener una distribución y un desglose de los tiempos para así calcular los

distintos índices operacionales que se requieren para la evaluación. (Global Mining Guidelines Group, 2020)

La estandarización de la norma ASARCO fue desarrollada por “*The Global Mining Guidelines Group (GMG)*” grupo de stakeholders de la industria minera, cuyo objetivo es identificar y documentar los datos dentro y fuera de la mina para su gestión y explotación, permitiendo un mejor rendimiento, seguridad y sostenibilidad en la minería.

Esta guía busca establecer definiciones estándar para los datos operativos de la minería, poniendo métricas de rendimiento comunes de la minería de superficie y eventos que deben ser reportados de manera consistente. Así, propone una un modelo común del uso del tiempo, herramienta que clasifica las actividades, los estados y los eventos, para que el personal de operaciones y de gestión pueda entender, controlar y gestionar el uso del tiempo de su operación, además de generar los KPI’s³ que habitualmente se utilizan en la minería.

El modelo de uso de tiempo propuesto por GMG presenta una representación gráfica de como las actividades productivas y no productivas, los estados y los eventos que ocurren en una operación minera. Ese modelo se basa en la premisa que la operación debe contabilizar todo el tiempo. Al identificar y eliminar el tiempo no productivo, las operaciones pueden hacer el mejor uso de sus activos y, por lo tanto, mejorar la eficiencia y la eficacia del equipo, lo que resulta en una mejora inmediata del rendimiento. A continuación, se presenta el modelo de uso de tiempo propuesto:

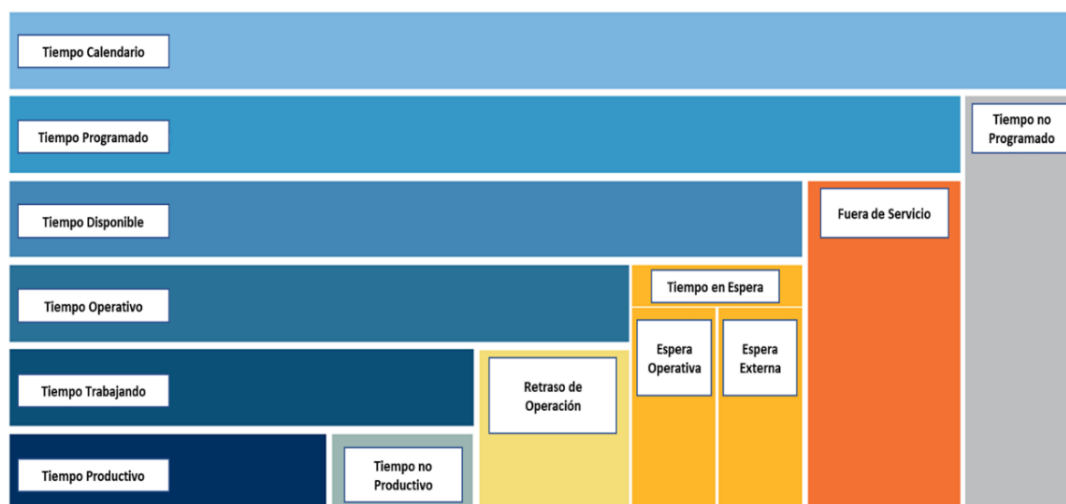


Figura 8: Modelo de uso de tiempo (Global Mining Guidelines Group, 2020).

Las categorías de tiempo definidas en la Figura 8 reflejan las clasificaciones comunes que la industria ha adoptado a lo largo del tiempo, las cuales se detallan a continuación (Global Mining Guidelines Group, 2020):

- **Tiempo Calendario:** tiempo total disponible, equivalente 365 días al año, 24 horas al día.
- **Tiempo Programado:** tiempo en el cual el equipo es necesario para cumplir con los objetivos del plan comercial y se asigna a una operación, proyecto o trabajo.
- **Tiempo No Programado:** tiempo en el cual el equipo está inactivo dado que no es necesario para cumplir los objetivos del plan comercial.

³ Key Performance Indicator: Indicador clave de rendimiento.

- **Tiempo Disponible:** tiempo que el equipo es necesario y está en condiciones de realizar su función prevista.
- **Tiempo Fuera de Servicio:** tiempo que el equipo es necesario, pero no está en condiciones de realizar su función prevista.
- **Tiempo Operativo:** tiempo que el equipo está disponible y bajo el control de un humano o sistema. Esta categoría es comúnmente referida como “Horas Brutas de Funcionamiento”.
- **Tiempo en Espera:** tiempo que el equipo está disponible pero no operando.
 - **Espera Operativa:** el equipo está disponible pero no está en funcionamiento, y no hay intención inmediata de operar debido a una decisión de la dirección o a razones que están bajo su control.
 - **Espera Externa:** el equipo está disponible, es necesario y está comprometido con un proyecto o trabajo, pero no puede ser operado por razones que están fuera de la influencia inmediata del control de la gestión operativa.
- **Tiempo de Trabajo:** el equipo está operando según lo asignado, realizando su función prevista, y llevando a cabo actividades que contribuyen y no contribuyen directamente a la producción.
- **Retraso de Operación:** el equipo está en funcionamiento, pero está temporalmente parado o impedido de realizar el trabajo debido a retrasos propios de la operación o a las condiciones físicas y ambientales inmediatas.
- **Tiempo Productivo:** el equipo cumple su función y realiza actividades que contribuyen directamente a la producción.
- **Tiempo No Productivo:** las actividades inevitables que no contribuyen directamente a la producción pero que son necesarias para permitir un funcionamiento continuo seguro y eficiente.

Las actividades que se clasifican dentro de este modelo son denominan como “elementos temporales básicos”, que son los sucesos utilizados para describir y registrar la actividad operativa. La Figura 9 presenta cómo se clasifican los elementos temporales básicos para los camiones según GMG.

Tiempo Productivo	Tiempo No Productivo	Retraso de Operación
• Acuatamiento carga • Carga • Viaje cargado • Acuatamiento descarga • Descarga	• Viaje vacío • Cola en carga • Cola en descarga • Parar en intersección	• Obstrucción vía • Cambio de sitio • Movimiento de pala • Limpieza de frente
Espera Operativa	Espera Externa	Tiempo No Programado
• Sin operador • Cambio de turno • Colación • Checkeo de equipos • Capacitación • Limpieza de derrames	• Equipo no requerido • Retraso de personal • Interrupción climática • Pérdida de energía <12 hrs • Pérdida de acceso al sitio <12 hrs • Pérdida de conectividad	• Días festivos • No hay trabajo planificado • Fuerza mayor • Pérdida de energía >12 hrs • Pérdida de acceso al sitio >12 hrs

Figura 9: Elementos temporales básicos de camiones según GMG.

2.4 Parámetros Operacionales

Tener un control de los parámetros operacionales relevantes del proceso de transporte se hace necesario para aumentar la productividad del proceso, identificar el estado del sistema, optimizar procesos, definir flotas de equipos y realizar mantenencias y reemplazos oportunamente.

Dentro de los parámetros operacionales más relevantes encontramos:

1. Payload.
2. Tiempos de ciclo.
3. Estados de los equipos.
4. KPI's de disponibilidad.
5. KPI's de utilización.
6. KPI's de eficiencia.
7. Productividad.

Algunos de estos parámetros se presentaron anteriormente, como el *payload* y el tiempo de ciclo en el apartado de **Transporte**, y los estados de los equipos en el apartado de la **Norma ASARCO**. A continuación, se definirán los parámetros operacionales faltantes, sin considerar el parámetro de productividad, el cual se definirá en un apartado diferente debido a la relevancia que tiene este en el presente trabajo. (Global Mining Guidelines Group, 2020)

I. KPI's de disponibilidad

- a. **Tiempo de Actividad:** tiempo total que el equipo es capaz de operar, tanto si está programado como si no.

$$\text{Tiempo de actividad} = \frac{\text{Tiempo Disponible}}{\text{Tiempo Calendario}} \quad (2.4)$$

- b. **Disponibilidad Física:** porcentaje de tiempo que el equipo está disponible para realizar su función prevista durante un período definido requerido por la operación.

$$\text{Disponibilidad Física} = \frac{\text{Tiempo Disponible}}{\text{Tiempo Programado}} \quad (2.5)$$

- c. **Disponibilidad Mecánica:** tiempo que el equipo está disponible como porcentaje del tiempo que requiere la operación. Esta puede calcularse de las siguientes maneras:

$$\text{Disponibilidad Mecánica} = \frac{\text{Tiempo Operativo}}{(\text{Tiempo Operativo} + \text{Tiempo Fuera de Servicio})} \quad (2.6)$$

II. KPI's de utilización (Global Mining Guidelines Group, 2020)

- a. **Uso de la Disponibilidad:** tiempo de funcionamiento del equipo como porcentaje del tiempo disponible.

$$\text{Uso de la Disponibilidad} = \frac{\text{Tiempo Operativo}}{\text{Tiempo Disponible}} \quad (2.7)$$

- b. **Utilización de los Activos:** tiempo de funcionamiento del equipo como un porcentaje del tiempo total disponible.

$$\text{Utilización de los Activos} = \frac{\text{Tiempo Operativo}}{\text{Tiempo Calendario}} \quad (2.8)$$

- c. **Utilización Operativa:** porcentaje de tiempo que el activo está siendo operado cuando se requiere que funcione.

$$Utilización Operativa = \frac{Tiempo Operativo}{Tiempo Programado} \quad (2.9)$$

- d. **Utilización Efectiva:** tiempo que el equipo se utiliza para realizar su función prevista como porcentaje del tiempo que está programado para trabajar.

$$Utilización Efectiva = \frac{Tiempo de Trabajo}{Tiempo Programado} \quad (2.10)$$

III. KPI's de eficiencia

- a. **Eficiencia Operativa:** también definida como “**Factor Operacional o Eficiencia**”, es el tiempo que el equipo está realizando su función prevista como porcentaje del tiempo que está funcionando.

$$Eficiencia Operativa = \frac{Tiempo de Trabajo}{Tiempo Operativo} \quad (2.11)$$

- b. **Eficiencia de la Producción:** tiempo que el equipo contribuye directamente a la producción como porcentaje del tiempo que está en funcionamiento.

$$Eficiencia de la Producción: \frac{Tiempo Productivo}{Tiempo Operativo} \quad (2.12)$$

2.4.1 Productividad

La productividad de los equipos, medida generalmente por turno o día, es el producto de la multiplicación de los factores que se definen a continuación (Magri, 2014).

- **Horas efectivas:** cantidad de horas del turno (o día) en que el equipo está cumpliendo su objetivo de diseño.
- **Rendimiento:** cantidad de material movido por el equipo en una hora efectiva.

$$Productividad \left[\frac{ton}{día} \right] = Horas Efectivas \left[\frac{hrs}{día} \right] \times Rendimiento \left[\frac{ton}{hrs} \right] \quad (2.13)$$

O bien según los siguientes factores:

- **Número de ciclos:** Cantidad de ciclos de transporte que logra completar el equipo durante un día.
- **Payload:** Cantidad de material con la cual el equipo es cargado en el comienzo de cada ciclo.

$$Productividad \left[\frac{ton}{día} \right] = N^{\circ} de Ciclos \left[\frac{ciclos}{día} \right] \times Payload \left[\frac{ton}{ciclo} \right] \quad (2.14)$$

Como se puede observar ecuación (2.13) la productividad puede aumentar de dos formas:

1. La primera es aumentando la cantidad de horas efectivas, es decir, reduciendo las horas de mantención, las horas en reserva, las horas de pérdidas operacionales o las horas de reservas.
2. La segunda opción es aumentando el rendimiento, que depende de las distancias que deben recorrer los equipos, su velocidad, su capacidad de carga, los tiempos de ciclo, entre otros.

Idealmente los cambios implementados en una operación deberían lograr aumentar tanto las horas efectivas como la productividad efectiva, obteniendo así un aumento en la productividad de los equipos

De la misma forma, la ecuación (2.14) establece que para obtener una mayor productividad se debe aumentar el número de ciclos que logra completar el equipo en un día o bien aumentar el *payload* que debe mover (lo cual depende los equipos de carguío). Por lo tanto, la producción dependerá de los números de ciclos, velocidad del equipo y los tiempos asociados al tiempo de ciclo (Magri, 2014).

Otro de los factores que afecta la productividad de los equipos es el desgaste de neumáticos. La minería es una actividad que, debido a las pesadas cargas que maneja, ejerce un gran estrés sobre los neumáticos de sus equipos. Por ello, la resistencia y la calidad de un neumático minero son cualidades cruciales para mantener la continuidad operacional (Minería Chilena, 2014).

En promedio, el costo de un neumático de un camión minero en el mercado supera los 5 mil dólares, y el tiempo de duración en una mina es de 4 mil horas. Por lo tanto, alargar la vida útil de los neumáticos de los camiones mineros es vital para poder cumplir con las metas de ahorro y productividad, enfocándose en aspectos de mantenimiento y operacionales.

En cuanto al mantenimiento, se realizan diferentes actividades que buscan controlar el desgaste de los neumáticos, entre estos están actividades como la rotación de neumáticos, cambio en la frecuencia de rotación, control de inflado, entre otros.

Por otro lado, en cuanto a aspectos operacionales, los operadores de los camiones son parte importante del cuidado de los neumáticos, puesto que ellos evitan el deterioro temprano de los neumáticos a través de una correcta operación de los camiones. Algunos de los procedimientos que deben seguir los operadores son: evitar la sobrecarga, cuidar el desplazamiento por curvas pronunciadas, no transitar a alta velocidad, no pasar por pistas abrasivas y evitar los derrames de fluidos (Codelco, 2016).

Además, es de vital importancia controlar el consumo de combustible, que debido a una mala gestión puede generar altos costos. Según el “Informe de actualización del consumo energético de la minería del cobre al año 2019”, el mayor consumo de combustible es generado por la minería a cielo abierto (ver Figura 10). Además, la participación del combustible en el consumo energético aumentó desde un 55,6% (en el año 2001) a un 80,1% (en 2019), donde el principal causante de esta tendencia es la gran cantidad de camiones que operan en este tipo de minas y su bajo rendimiento (Comisión Chilena del Cobre, 2020).

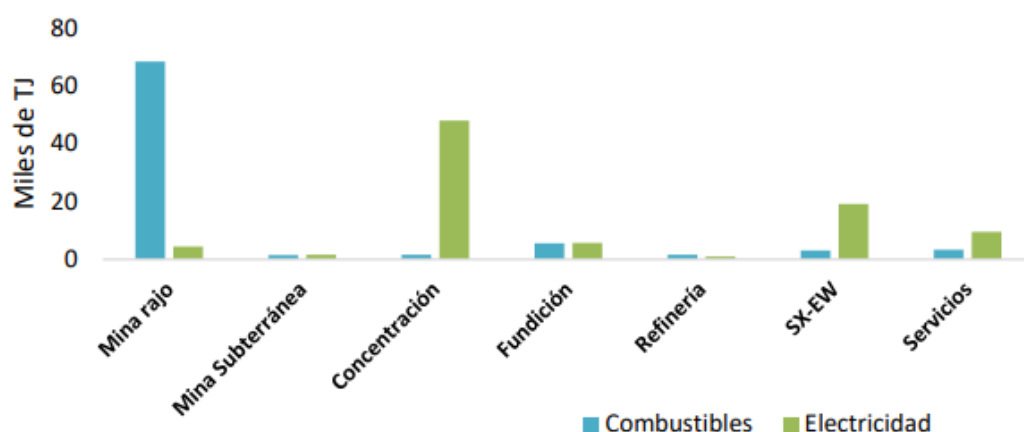


Figura 10: Consumo de electricidad y combustibles por procesos en la minería del cobre.

2.4.2 Benchmark de Parámetros Operacionales

A continuación, se presenta información benchmark de parámetros operacionales de camiones en minería a cielo abierto (disponibilidad física, UEBD y eficiencia), análisis realizado entre 12 operaciones de la gran minería de cobre en Chile y 7 operaciones de Australia, Canadá, Estados Unidos y Perú. (Comisión Nacional de Productividad, 2017).

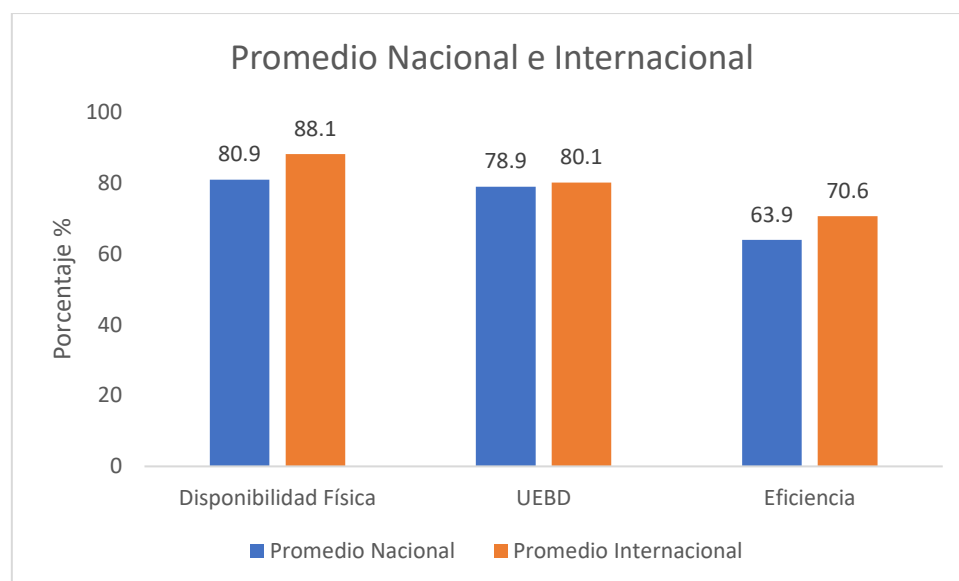


Figura 11: Información benchmark sobre parámetros de disponibilidad, UEBD y eficiencia promedio de la industria nacional e internacional.

Como se puede observar en la Figura 11, los parámetros promedio nacionales de disponibilidad física, UEBD y eficiencia (entendiendo eficiencia como las horas efectivas en porcentaje, la cual se obtiene de la multiplicación entre la disponibilidad física y el UEBD) se encuentran por debajo del promedio internacional. En el caso de la disponibilidad, el promedio nacional se encuentra 7,2 p.p.⁴ por debajo del promedio internacional. En el caso del UEBD, el promedio nacional se encuentra 1,2 p.p. por debajo del promedio internacional. Y finalmente, el promedio nacional de la eficiencia se encuentra 6,7 p.p. por debajo del promedio internacional. El valor de la

⁴ Punto porcentual

eficiencia se puede presentar en forma de horas efectivas, al multiplicar el porcentaje por 24 horas, así el promedio nacional e internacional de horas efectivas son 15,3 horas y 16,9 horas.

Por otra parte, la comisión nacional de productividad analiza parámetros como el porcentaje de fuera de servicio, la cual alcanza un promedio en la industria nacional de 17,6% del tiempo posible, alcanzando un 8,5% como su mejor desempeño dentro de la industria nacional. Otro parámetro analizado es el porcentaje de detenciones (considera actividades como cambio de turno, colación, espera por relevo, baño, traslado de equipos, combustible, etc.), donde el promedio de la industria nacional alcanza un 22,3% del tiempo disponible, alcanzando un 10,0% como su mejor desempeño dentro de la industria nacional.

3. METODOLOGÍA ÁRBOL DE VALOR

La metodología Árbol de Valor consiste en la descomposición de parámetros de control operacional en niveles jerárquicos, identificando de manera visual y numérica las brechas existentes en un proceso. Esta metodología valoriza los parámetros definidos, identifica el impacto que generan en la operación y permite priorizar medidas para mejorar el proceso.

Para entender esta metodología, es necesario comprender otros modelos de clasificación que funcionan como base para la metodología de árbol de valor.

3.1 Bases de la Metodología Árbol de Valor

3.1.1 Árbol de Decisión

Los árboles de decisión constituyen probablemente el modelo de clasificación más popular y utilizado. Este modelo de clasificación consiste en una división jerárquica y secuencial del problema en el que cada una de estas divisiones describe gráficamente las decisiones posibles y por lo tanto los resultados de las distintas combinaciones de decisiones y eventos. A cada evento se le asignan probabilidades y a cada una de las ramas se le determina un resultado. Los árboles representan “reglas” que pueden ser entendidas por lo humanos con la ventaja de que el conocimiento lo genera el mismo árbol y no parte de la premisa de un experto en el tema (Dupouy, 2014).

La mayoría de los algoritmos utilizados para construir un árbol son variaciones de uno genérico llamado “*Greedy algorithm*” que básicamente va desde la raíz hacia abajo (*Top-Down*) buscando de manera recursiva los atributos que generan el mejor árbol hasta encontrar el óptimo global con una estructura de árbol lo más simple posible (Dupouy, 2014).

Los elementos que componen la estructura de un árbol de decisión son los siguientes (Demodaran, 2007):

1. **Nodos de decisión:** caminos de acción que pueden ser elegidos por el “tomador de decisión” después de haber analizado los resultados de decisiones previas.
2. **Nodos de evento:** representan los posibles resultados en una decisión que implica riesgo. Es necesario determinar los posibles resultados y la probabilidad de ocurrencia de cada uno basados en la información disponible al momento de plantear el árbol de decisión. Puede ocurrir que después de nodos de eventos continúe el proceso de selección entre alternativas probables.
3. **Nodos finales:** resultados finales generados por la serie de decisiones y resultados previos del proceso que implicaron diferentes niveles de riesgo.

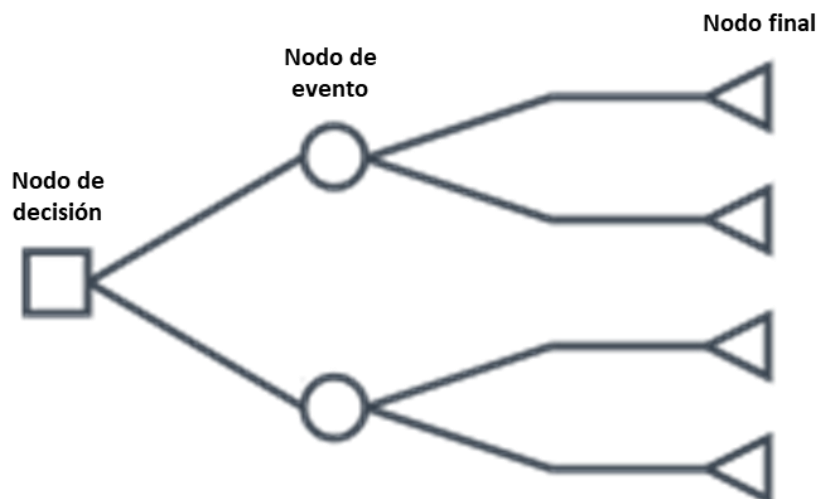


Figura 12: Ejemplo de diagrama de árbol de decisión.

Esta metodología es usada en la toma de decisiones en situaciones como (Demodaran, 2007):

1. **Respuesta a situaciones de riesgos:** evaluar las acciones o alternativas que surgen para eventos inciertos y evitar resultados adversos inesperados.
2. **Valorar la información disponible:** permiten comparar los beneficios y costos de invertir recursos en obtener más información para optimizar la toma de decisiones.
3. **Manejo de riesgos:** permite identificar los riesgos futuros para determinar cuáles deben evitarse o mitigarse y los beneficios y costos de hacer esto.

Particularmente esta metodología es buena para manejar los riesgos secuenciales, pero los riesgos que ocurren simultáneamente no son fáciles de modelar bajo los árboles de decisión.

3.1.2 Árbol Impulsor de Valor

Este modelo de clasificación comienza en la década de 1920 con el modelo DuPont, el cual consiste en una descomposición la operación de una empresa en indicadores que determinen la fuente de utilidades, básicamente se desglosan las medidas de interés, creando una red de medidas que ayuden a comprender el impacto que tendría un pequeño cambio de estas.

Un árbol impulsor de valor⁵ es una forma de visualizar un modelo de negocio vinculando la métrica de valor con los impulsores operativos (lo que afecta la métrica de valor). En este sentido, un árbol impulsor de valor es la representación visual de un modelo matemático de un negocio (o una parte de este) (Cambitsis, 2013).

Los aspectos clave de un árbol impulsor de valor son (Hilgefort, 2020):

- Vincula la métrica de valor a los impulsores operativos, en otras palabras, vincula el valor a los factores que influyen.
- Herramienta visual que crea una relación visual entre la entrada y la salida.
- Estructura de árbol que permite visualizar la cadena de consecuencias.

A continuación, se presenta un ejemplo del árbol impulsor de valor, donde el elemento “Beneficio” no solo se relaciona a los “Ingresos”, sino también con el “Costo”, variables que a su

⁵ Value Driver Tree

vez se descomponen en otros elementos. Para el caso de los “Ingresos”, esta se descompone en “Precio por unidad” y “# unidades vendidas”. Mientras que el “Costo” se descompone, por un lado, por “Costo variable”, el cual a su vez se descompone en “Costo por unidad” y “Unidades producidas”, y por el otro lado por el “Costo fijo”. Esto queda representado en la Figura 13. Dicho árbol impulsor de valor muestra la métrica del “Beneficio” y como esta se relaciona con otros elementos.

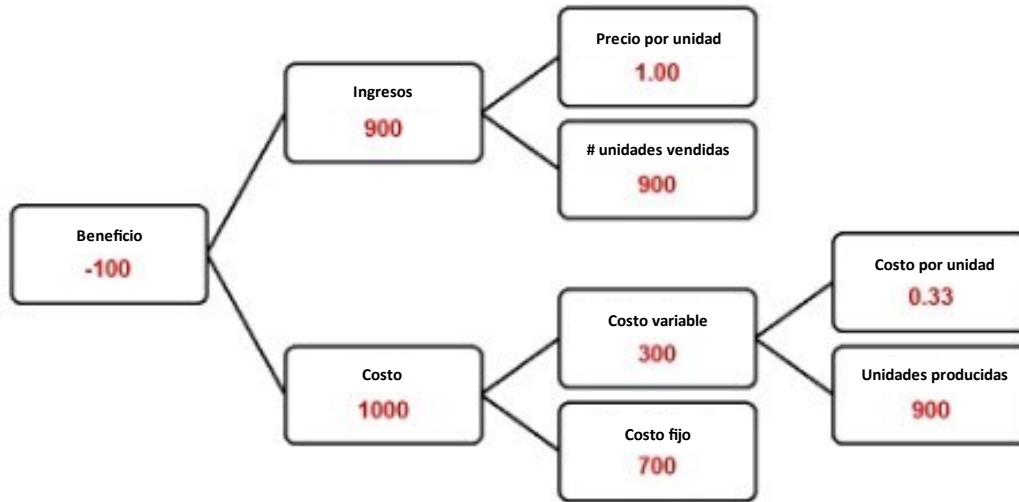


Figura 13: Ejemplo de árbol impulsor de valor.

Un árbol impulsor de valor es una herramienta visual que se puede usar para mostrar interdependencias, validar rápidamente suposiciones, ejecutar un conjunto de simulaciones y obtener transparencia en la organización. La variedad de escenarios permite visualizar los factores que influyen en los KPI y ejecutar simulaciones para que comprenda mejor cómo estos factores de influencia afectan al negocio en general.

3.2 Definición de Parámetros

Entendiendo la base de la metodología de Árbol de Valor, se procede a entender las variables que afectan el KPI principal que se quiere medir y controlar, en este caso la productividad de los camiones, representado por la cantidad de toneladas transportadas al día por camión.

Si el KPI principal que tratamos de delinear es el tonelaje transportado al día por camión, entonces se deben definir los parámetros que influyen directamente en este KPI.

Hay tres grandes parámetros que influyen directamente en el tonelaje transportado, *payload*, Tiempo de Ciclo y Tiempo Efectivo. A partir de las ecuaciones (2.13) y (2.14) se puede obtener la ecuación que representa el tonelaje transportado al día por camión:

$$Productividad \left[\frac{ton}{día} \right] = Horas Efectivas \left[\frac{hrs}{día} \right] \times Rendimiento \left[\frac{ton}{hrs} \right] \quad (3.1)$$

$$Productividad \left[\frac{ton}{día} \right] = Tonelaje Transportado \left[\frac{ton}{día} \right] \quad (3.2)$$

$$Rendimiento \left[\frac{ton}{hrs} \right] = Payload \left[\frac{ton}{vuelta} \right] \div Tiempo Ciclo \left[\frac{hrs}{vuelta} \right] \quad (3.3)$$

$$Horas Efectivas \left[\frac{hrs}{día} \right] = Tiempo Efectivo \left[\frac{hrs}{día} \right] \quad (3.4)$$

Así, el tonelaje transportado queda representado según la siguiente ecuación:

$$\text{Tonelaje Transportado} \left[\frac{\text{ton}}{\text{día}} \right] = \left(\text{Payload} \left[\frac{\text{ton}}{\text{vuelta}} \right] \div \text{Tiempo Ciclo} \left[\frac{\text{hrs}}{\text{vuelta}} \right] \right) \times \text{Tiempo Efectivo} \left[\frac{\text{hrs}}{\text{día}} \right] \quad (3.5)$$

3.2.1 Payload

Payload o capacidad de carga útil es un parámetro que mide la cantidad de material que transporta el camión en cada ciclo. Este parámetro influye directamente en el tonelaje transportado por camión.

El *payload* puede verse afectado por los parámetros presentados a continuación:

- **Diseño de la tolva:** el diseño de la tolva tiene gran relevancia en cuanto a la cantidad de material que puede transportar un camión minero. Estas son diseñadas según las necesidades de las empresas, teniendo en cuenta las características del material que se transportará, abrasión, riesgo de adherencia, capacidad, vida útil y mantenimiento.
- **Estiba:** la estiba consiste en el adecuado posicionamiento de la carga en la tolva. Esta actividad, realizada de manera correcta, maximiza el aprovechamiento del espacio disponible en la tolva: Esto dependerá tanto del operador del camión minero como del operador de pala.
- **Calibración de pesómetros:** una correcta calibración de los pesómetros permite saber exactamente cuánto material es cargado en el camión minero, evitando cargas inferiores a lo requerido y así controlar la producción.

3.2.2 Tiempo de Ciclo

El tiempo de ciclo del camión minero es otro de los parámetros importantes que afecta directamente en el tonelaje transportado por camión, donde la disminución de este parámetro hará que el KPI principal aumente.

Como se explicó en la sección de **Transporte**, el tiempo de ciclo del camión dependerá de tareas habituales que ocurren en una operación normal de transporte (ver Figura 4). Cabe destacar que el análisis del presente trabajo se basará en el tiempo de ciclo efectivo, por lo que los tiempos de “espera” y “cola” no serán considerados. Los tiempos que se considerarán se pueden dividir en dos grupos, tiempos “fijos” y tiempos “variables”.

- **Tiempos fijos:** se define como tiempo fijo a las actividades del ciclo de transporte en donde el camión minero no se encuentra viajando (ya sea cargado o vacío), si no en actividades como:
 - **Tiempo cuadrando o aculatamiento en carga:** tiempo donde el operador debe maniobrar el equipo y posicionarse para recibir el material de la pala.
 - **Tiempo de carga:** tiempo donde camión espera que el equipo de carguío vacíe material sobre su tolva hasta su totalidad.
 - **Tiempo de retroceso o aculatamiento en descarga:** tiempo donde el operador debe maniobrar el equipo y posicionarse para descargar el material.
 - **Tiempo de descarga:** tiempo que le toma al camión el levantar la tolva y descargar el mineral sobre su destino hasta que baje la tolva a su posición inicial. La descarga puede efectuarse en chancado (en caso de que sea mineral), en stocks (mineral estratégico) o en botaderos (estéril).
- **Tiempos variables:** se define como tiempo variable a las actividades del ciclo de transporte en donde el camión minero se encuentra viajando, ya sea cargado o vacío.

- **Tiempo viaje vacío:** tiempo en que el camión se dirige al frente de carguío.
- **Tiempo viaje cargado:** tiempo en que el camión se dirige a su destino de descarga.

Además de parámetros de tiempo, existen otros parámetros que afectarán el tiempo de ciclo del camión:

- **Velocidad:**
 - **Cargado:** velocidad de camión cargado en recorridos subiendo y en plano.
 - **Vacío:** velocidad de camión vacío en recorridos bajando y en plano.
- **Distancia:**
 - Distancias horizontales.
 - Distancias inclinadas.
- **Modelo del camión:** cada modelo de camión tiene características diferentes que afectaran la productividad del camión, donde la velocidad que pueden alcanzar toma un papel importante.
Por ejemplo, camiones como CAT797F, Komatsu 930E-4SE alcanzan velocidades máximas superiores a los 60 [km/hr], mientras que modelos como el camión Liebherr T282B alcanza velocidades máximas que no superan los 55 [km/hr] debido a un tema de seguridad por los frenos.
- **Buenas prácticas del operador:** el proceso de operación del camión minero por parte del operador afectará los tiempos de ciclo, donde un operador bien capacitado podría optimizar el tiempo de ciclo del camión.
- **Diseño de rutas de transporte:** el diseño de las rutas de transporte utilizadas por los camiones mineros es un parámetro relevante que considerar, donde se destacan tres aspectos: el diseño geométrico, estructural y funcional (Corporación de Desarrollo Tencológico, 2015).
 - **Diseño geométrico:** se refiere al trazado y la alineación, tanto en el plano horizontal (radios de curva), como vertical (pendientes). Estos factores definen entre otros las distancias de detención, distancias de visibilidad, trazado de las intersecciones, pretilles de bermas y/o separación de pistas y ancho del camino, dentro de los límites impuestos por el tránsito.
 - **Diseño estructural:** se refiere a qué tipo de estructuras (materiales y espesores) se utilizarán para soportar las cargas de tránsito impuestas por los equipos de extracción durante la vida útil del camino. La realización de un correcto diseño estructural permitirá disminuir los costos totales de largo plazo asociados a la construcción de los caminos (inversión inicial) y los programas de mantenimiento periódicos.
 - **Diseño funcional:** se centra en la selección de materiales de la carpeta de rodado (capa superficial de la estructura) la cual estará afecta no solo a las cargas de tránsito sino también al desgaste por erosión que producen los equipos mineros y las variables medioambientales (principalmente lluvia y nieve).
- **Congestión:** la congestión se produce cuando el volumen de tráfico genera una demanda de espacio mayor que el disponible en las rutas. Esto puede deberse a condiciones desfavorables de la ruta, como obstrucciones, incidentes, mala gestión del despacho de camiones, entre otros, afectando directamente al tiempo de ciclo.

3.2.3 Tiempo Efectivo

Por último, el tiempo efectivo es otro de los parámetros importantes que afecta directamente en el tonelaje transportado por camión, este se relaciona al tiempo en que el equipo se

encuentra desarrollando las actividades específicas de diseño para los cuales ha sido adquirido por la organización. Este tiempo se asemeja al “Tiempo Productivo” propuesto por GMG y es calculado según la siguiente ecuación:

$$\text{Tiempo Efectivo} = 24 \times \text{Disponibilidad Física} \times \text{UEBD} \quad (3.6)$$

Este parámetro está relacionado con los estados del equipo, dentro de los cuales encontramos los siguientes parámetros que afectan dicho KPI:

- **Disponibilidad física:** porcentaje de tiempo que el equipo está disponible para realizar su función prevista durante un período definido requerido por la operación.
- **Utilización efectiva en base disponible (UEBD):** corresponde a la fracción porcentual del tiempo disponible en donde el equipo se encuentra en producción pura y sin pérdidas operacionales.
- **Fuera de servicio:** tiempo que el equipo es necesario, pero no está en condiciones de realizar su función prevista.
- **Pérdidas operacionales:** tiempo en que el equipo no puede cumplir con su función operacional productiva debido a ineficiencias presentes e inherentes a los ciclos operativos.
- **Demoras:** ineficiencias del proceso productivo de las cuales no se conoce o se tiene certeza de su ocurrencia tanto en el espacio de tiempo como su duración.
- **Reservas:** tiempo en que el equipo está disponible pero no operando.

3.3 Construcción de Metodología

Para construir la metodología de Árbol de Valor es necesario:

1. Entender la problemática que se quiere controlar (KPI principal).
2. Identificar los parámetros operacionales que afectan al KPI principal (definición del Primer Nivel del Árbol de Valor)
3. Identificar los parámetros que dan la estructura y soporte al Árbol de Valor, procurando incluir parámetros cuantificables.
4. Una vez definida la estructura, se deben cuantificar los parámetros operacionales, permitiendo comparar valores reales con valores esperados.
5. Finalmente se realiza un análisis de impacto, donde se busca visualizar de manera rápida y eficaz el efecto que tiene cada parámetro operacional del Árbol de Valor en el KPI principal.

A continuación, se explica en detalle la construcción de la metodología:

Uno de los problemas de los últimos años ha sido la productividad, donde se estima que la productividad en la industria cayó en el orden de 1% a 1,5% anual entre los últimos años. Como se mencionó en el apartado **Productividad** una de las razones de este descenso se debe a razones propias de la faena. Al ser la operación de transporte un proceso que representa cerca del 50% del costo mina, medir y controlar la productividad de las flotas de transporte toma mayor relevancia.

Para nuestro caso de estudio, la problemática se centra en el proceso de transporte de material, por lo que el objetivo principal será controlar y medir la cantidad de toneladas transportadas por los camiones mineros, entendiendo los factores que influyen a este parámetro.

Como se explicó en el apartado de **Definición de Parámetros**, existen tres grandes grupos que afectan el tonelaje transportado, resultando el primer nivel del Árbol de Valor, presentado a continuación:

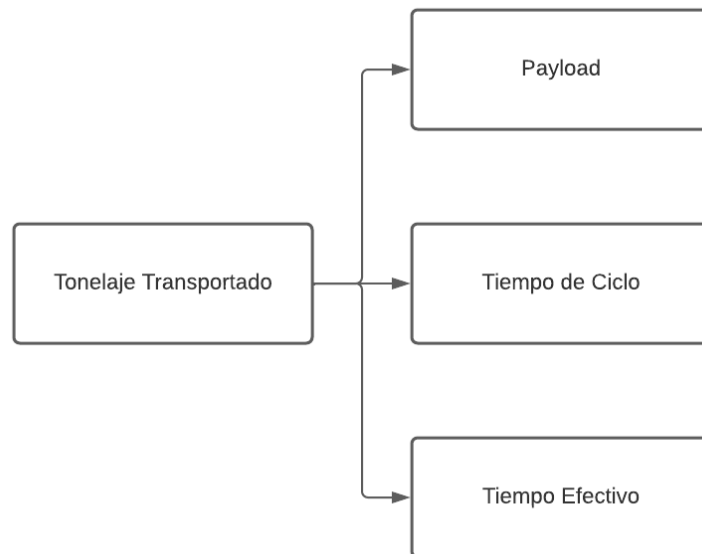


Figura 14: Primer nivel del Árbol de Valor.

Si el KPI principal que tratamos de delinear es el tonelaje transportado, entonces estos parámetros son críticos, influyendo directamente en la productividad de los camiones.

Habiendo determinado el primer nivel del Árbol de Valor, ahora es necesario identificar los elementos y la estructura de soporte para nuestro Árbol de Valor, por lo que se debe incluir los parámetros claves, pero ¿cómo se llega a crear esta estructura y cómo se encuentran esos elementos clave?

Esta es la parte en la que se debe desglosar aún más los parámetros identificados y analizar que parámetros podrían ser incluidos en el árbol de valor.

El principal criterio que se debe considerar para incluir parámetros en el Árbol de Valor es que estos sean de carácter cuantificable, dado que la idea principal del Árbol de Valor es realizar una valorización de los parámetros identificados.

A continuación, se presenta una tabla que busca dividir los parámetros principales en parámetros cuantificables y no cuantificables.

Tabla 2: Desglose de parámetros principales en parámetros cuantificables y no cuantificables.

Parámetros Principales	Parámetros Cuantificables	Parámetros No Cuantificables
Payload	-	- Forma de Tolva - Estiba - Calibración de Pesómetros
Tiempo de Ciclo	- Tiempos Fijos - Tiempos Variables - Velocidad - Distancia	- Modelo de Camión - Buenas Prácticas de Operación - Diseño de Ruta - Congestión
Tiempo Efectivo	- Disponibilidad de Equipo - UEBD - Fuera de Servicio - Pérdidas Operacionales - Demoras - Reservas	-

Como se puede observar en la Tabla 2, los parámetros pertenecientes a la columna de “parámetros cuantificables” serán en primera instancia los seleccionados para la construcción de los siguientes niveles del Árbol de Valor. Para el caso del segundo nivel, este queda conformado de la siguiente manera:

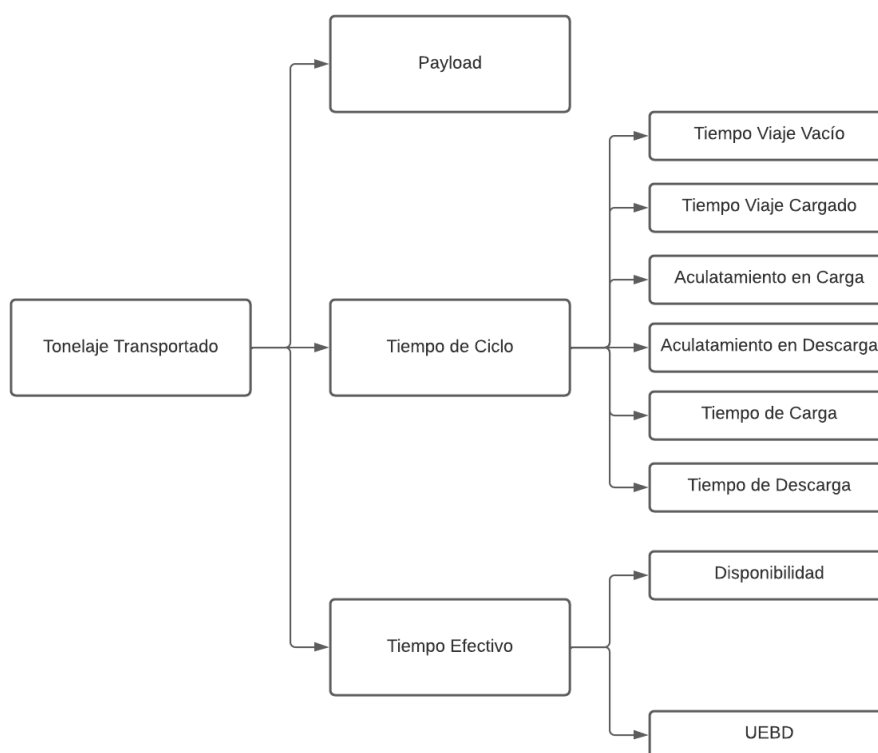


Figura 15: Segundo nivel de Árbol de Valor.

Como se puede observar en la Figura 15, el *payload* es el parámetro final de esa ramificación.

Para el caso del tiempo de ciclo, este se puede ramificar en seis parámetros distintos:

- **Tiempo de viaje vacío:** afectado por la velocidad que alcance el camión y la distancia que este deba recorrer.
- **Tiempo de viaje cargado:** afectado por la velocidad que alcance el camión y la distancia que este deba recorrer.
- **Acuatamiento en carga:** afectado únicamente por la habilidad que tenga el operador al maniobrar el camión.
- **Acuatamiento en descarga:** afectado únicamente por la habilidad que tenga el operador al maniobrar el camión.
- **Tiempo de carga:** afectado únicamente por la habilidad que tenga el operador de pala al cargar el camión.
- **Tiempo descarga:** afectado únicamente por la habilidad que tenga el operador al maniobrar el camión.

Para el caso del tiempo efectivo de la operación, este se puede ramificar en dos parámetros distinto:

- **Disponibilidad:** afectado por el tiempo en fuera de servicio que pasa el camión.
- **UEBD:** afectado por tiempos de pérdidas operacionales, demoras y reservas que tienen los camiones.

A continuación, se presenta el tercer nivel del Árbol de Valor:

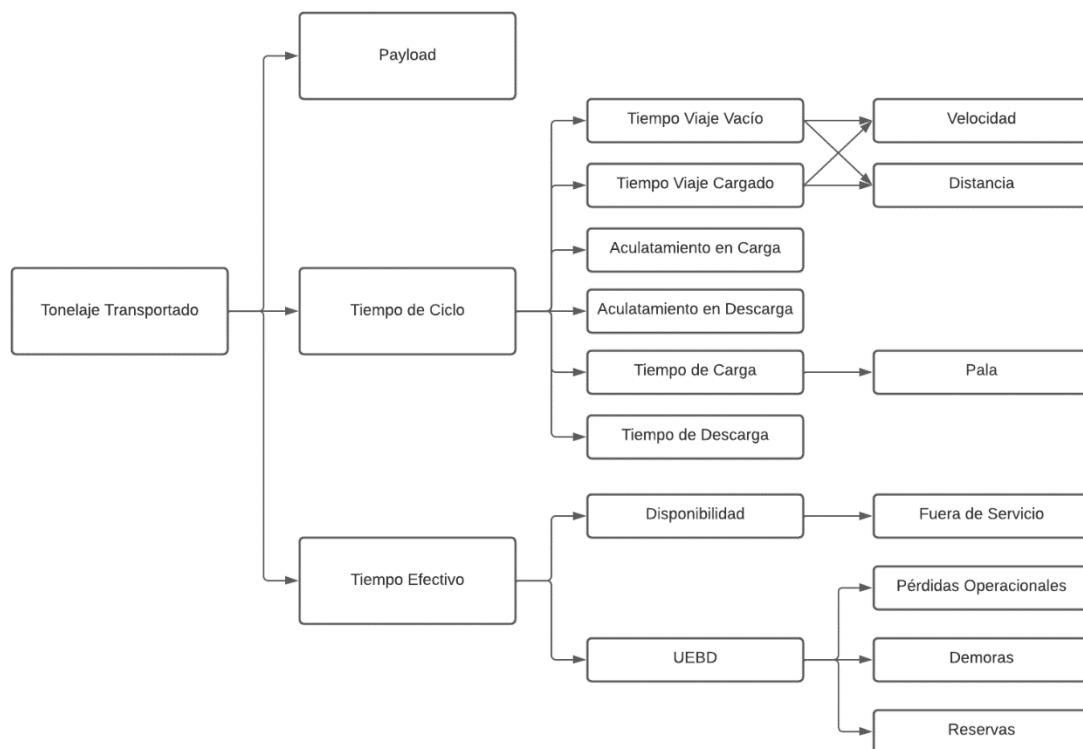


Figura 16: Tercer nivel de Árbol de Valor.

Como se puede observar en la Figura 16, parámetros como acuatamiento en carga, en descarga y tiempo de descarga, no tienen un desglose cuantificable, por lo que su ramificación termina en el segundo nivel.

Cabe destacar que cada parámetro se podría desglosar sucesivamente en otros, aumentando cada vez los niveles del Árbol de Valor, pero a su vez estos nuevos niveles tendrían una menor relevancia en el KPI principal.

Habiendo construido la estructura del Árbol de Valor, el siguiente paso es cuantificar los parámetros definidos. Para ello, se debe utilizar información proveniente del sistema de administración de flotas de la mina en estudio, la cual entregará data real sobre los equipos que se quieren analizar, e información de planificación de la mina en estudio y/o información benchmark sobre los parámetros, la cual servirá para realizar una comparación entre la data real y la data planificada o benchmark.

A modo de ejemplo, se presenta el primer nivel del Árbol de Valor, utilizando los siguientes valores planificados y reales:

Tabla 3: Valores ejemplo para parámetros operacionales del primer nivel del Árbol de Valor.

Parámetro	Plan	Real
Payload [ton/vuelta]	292	284
Tiempo de Ciclo [min/vuelta]	29,9	34,5
Tiempo Efectivo [hrs/día]	14,6	14,3

A partir de esta información, se calcula según la ecuación (3.5) el tonelaje transportado al día por camión para el caso planificado y el caso real, resultando en 8.557 [ton/día] y 7.054 [ton/día] respectivamente.

Así, la visualización del primer nivel del Árbol de Valor queda representado de la siguiente forma:

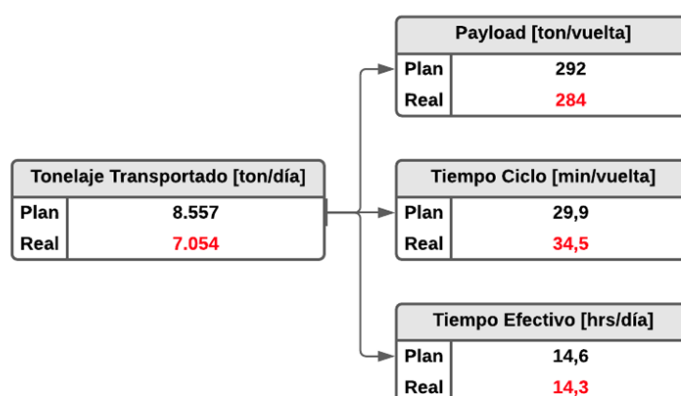


Figura 17: Ejemplo del primer nivel del Árbol de Valor.

En la Figura 17, se puede observar en color rojo los parámetros que no alcanzan el valor esperado de la planificación. Se observa una brecha en el tonelaje transportado al día por camión de 1.503 [ton], equivalente a un 17,6% de déficit.

El siguiente paso es realizar un análisis de impacto, donde se busca visualizar de manera rápida y eficaz el efecto que tiene cada parámetro operacional del Árbol de Valor en el KPI principal.

La metodología que se debe seguir para analizar el impacto de cada parámetro operacional se detalla a continuación:

1. Se utilizan como base de comparación los parámetros operacionales planificados de la mina en estudio.
2. Partiendo por el primer nivel del Árbol de Valor, se varía solo el valor de uno de los parámetros operacionales planificados por su valor real respectivo, obteniendo un nuevo tonelaje transportado al día por camión. A modo de ejemplo se realiza el ejercicio variando el valor planificado del *payload* de 292 [ton] por su valor real de 284 [ton].}

$$\text{Tonelaje Transportado}_{\Delta \text{payload}} \left[\frac{\text{ton}}{\text{día}} \right] = 284 \left[\frac{\text{ton}}{\text{vuelta}} \right] \div \left(29,9 \left[\frac{\text{min}}{\text{vuelta}} \right] \times \frac{1}{60} \left[\frac{\text{hrs}}{\text{min}} \right] \right) \times 14,6 \left[\frac{\text{hrs}}{\text{día}} \right] \approx 8.323 \left[\frac{\text{ton}}{\text{día}} \right] \quad (3.7)$$

3. A continuación, se calcula el impacto que genera este parámetro (*payload*) en el KPI principal, según la siguiente ecuación:

$$\text{Impacto}_{\text{payload}} [\%] = \frac{\left(\text{Tonelaje Transportado}_{\Delta \text{payload}} \left[\frac{\text{ton}}{\text{día}} \right] - \text{Tonelaje Transportado}_{\text{plan}} \left[\frac{\text{ton}}{\text{día}} \right] \right)}{\text{Tonelaje Transportado}_{\text{plan}} \left[\frac{\text{ton}}{\text{día}} \right]} \times 100 [\%] \quad (3.8)$$

$$\text{Impacto}_{\text{payload}} [\%] = \frac{\left(8.323 \left[\frac{\text{ton}}{\text{día}} \right] - 8.557 \left[\frac{\text{ton}}{\text{día}} \right] \right)}{8.557 \left[\frac{\text{ton}}{\text{día}} \right]} \times 100 [\%] \approx -2,7 [\%] \quad (3.9)$$

4. Repitiendo este ejercicio para los demás parámetros del primer nivel del Árbol de Valor, se obtiene un impacto para el *payload*, tiempo de ciclo y tiempo efectivo de (-2,7%), (-13,3%) y (-2,3%) respectivamente.
5. El siguiente paso es **calcular el impacto ajustado** de cada parámetro, el cual busca valorizar dicho impacto como un equivalente al impacto general (entendiéndose como impacto general al impacto generado por los parámetros operacionales en conjunto sobre el KPI principal). Esto se calcula a partir de la ecuación (3.10) , donde "*Impacto Ajustado_{p_n}*" corresponde al impacto ajustado del parámetro operacional analizado (*p_n*) (este impacto ajustado se denominará más adelante simplemente como "impacto"), "*Impacto_{general}*", el cual corresponde en este caso ejemplo a (-17,6%) e "*Impacto_{suma nivel}*", el cual corresponde a la suma de los impactos generados por los diferentes parámetros del nivel correspondiente, resultando en este caso ejemplo de (-18,3%).

$$\text{Impacto Ajustado}_{p_n} [\%] = \left(\text{Impacto}_{p_n} [\%] \times \text{Impacto}_{\text{general}} [\%] \right) \div \text{Impacto}_{\text{suma nivel}} \times 100 [\%] \quad (3.10)$$

A modo de ejemplo se realiza este ejercicio con el parámetro *payload*.

$$\text{Impacto Ajustado}_{\text{payload}} [\%] = (-2,7 [\%] \times -17,6 [\%]) \div -18,3 [\%] \approx -2,7 [\%] \quad (3.11)$$

6. Repitiendo este ejercicio para los demás parámetros del primer nivel del Árbol de Valor, se obtiene un impacto ajustado para el *payload*, tiempo de ciclo y tiempo efectivo de (-2,7%), (-12,7%) y (-2,2%) respectivamente, donde la suma de estos resulta en (-17,6%), siendo equivalente al impacto obtenido a partir de la metodología de Árbol de Valor. Cabe destacar que, para los siguientes niveles del Árbol de Valor, se utiliza el "*Impacto Ajustado_{p_n}*" del nivel anterior como *Impacto_{general}*.
7. Además, el impacto ajustado puede representarse como **impacto en base cien por ciento**, facilitando aún más la visualización de los resultados. Esto se realiza al representar el impacto en el KPI principal como un cien por ciento. En este caso ejemplo, el (-17,6%)

quedaría representado como un "*Impacto General*_{Base 100%}" de (-100%). Así, los impactos en base cien por ciento de los parámetros del siguiente nivel son calculados a partir de la ecuación (3.12), donde "*Impacto P_{nBase 100%}*" corresponde al nuevo impacto del parámetro operacional analizado (*p_n*).

$$Impacto P_{nBase 100\%} [\%] = (Impacto Ajustado_{p_n} [\%] \times Impacto General_{Base 100\%} [\%]) \div Impacto General [\%] \quad (3.12)$$

A modo de ejemplo se realiza este ejercicio con el parámetro de tiempo de ciclo.

$$Impacto Payload_{Base 100\%} [\%] = (-2,7 [\%] \times -100 [\%]) \div -17,6 [\%] \approx -14,9 [\%] \quad (3.13)$$

8. Repitiendo este ejercicio para los demás parámetros del primer nivel del Árbol de Valor, se obtiene un impacto en base cien por ciento para el *payload*, tiempo de ciclo y tiempo efectivo de (-14,9%), (-72,5%) y (-12,6%) respectivamente, donde la suma de estos resulta en un (-100%). Cabe destacar que, para los siguientes niveles, se usa el "*Impacto P_{nBase 100%}*" del nivel anterior como *Impacto General*_{Base 100%}.
9. Este ejercicio se repite en los siguientes niveles del Árbol de Valor, tomando como base el impacto del parámetro del nivel anterior.

Cabe destacar que un porcentaje negativo representa el impacto en el KPI principal que genera el valor real del parámetro operacional al no alcanzar el valor esperado por el plan, mientras que un porcentaje positivo representa el impacto en el KPI principal que genera el valor real al ser mejor al valor esperado por el plan.

Así, la visualización final del caso ejemplo para el primer nivel del Árbol de Valor sería la siguiente:

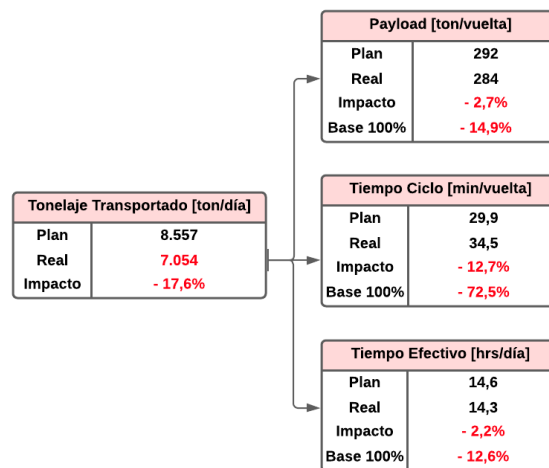


Figura 18: Ejemplo de estructura final del primer nivel del Árbol de Valor

La Figura 18 representa un ejemplo de la estructura final que seguiría el primer nivel del Árbol de Valor, identificando de manera rápida y eficaz el impacto que generan los distintos parámetros operacionales en el KPI principal.

4. DESARROLLO DEL ESTUDIO

4.1 Caso de Estudio

La metodología de Árbol de Valor fue evaluada en una mina de cielo abierto real de la industria nacional, donde se analizó la flota de camiones de mayor presencia en la mina, correspondiente a la flota de **Komatsu 930E-4SE**, perteneciente a la clase de 290 toneladas.

Tabla 4: Modelos y cantidad de camiones presentes en la mina.

Modelo de Camión	Cantidad
CAT 797-F	5
Komatsu 930E-4	9
Komatsu 930E-4SE	35
Komatsu 930E-N	8
Komatsu 930E-R	20
Komatsu 960E-5	1
Komatsu 980E-5	10
Liebherr T282-B	9
Liebherr T282-C1	11
Total	108

A partir del sistema de administración de flotas, se recibió información relacionada al *payload*, tiempos y estados de los camiones en un rango de tiempo de seis meses, desde enero a junio de 2021. Cabe destacar que la información recibida presenta algunos errores en la toma de datos, por lo que dicha información se debe preparar antes de ser analizada.

Parte de la información recibida relacionada a tiempos y *payload* del camión se puede observar en **A.1 Anexo: Información relacionada a tiempos de ciclo y payload del camión**.

Parte de la información recibida relacionada a los estados del camión se puede observar en **A.2 Anexo: Información relacionada a estados del camión**.

En cuanto a la Norma ASARCO del caso de estudio, esta se puede observar en **A.3 Anexo: Norma Asarco caso de estudio**.

4.1.1 Parámetros Operacionales Planificados por Mina

Los parámetros operacionales planificados por la mina en estudio para la flota de camiones Komatsu 930E-4SE en el periodo de enero a junio de 2021 se presenta a continuación:

- **Payload:** la planificación considera el valor teórico que puede cargar el camión. En este caso el camión Komatsu 930E4-SE, tiene un *payload* teórico de **292 [ton]**.
- **Distancia:** la distancia planificada que deben recorrer los camiones Komatsu 930E4-SE se muestra a continuación:

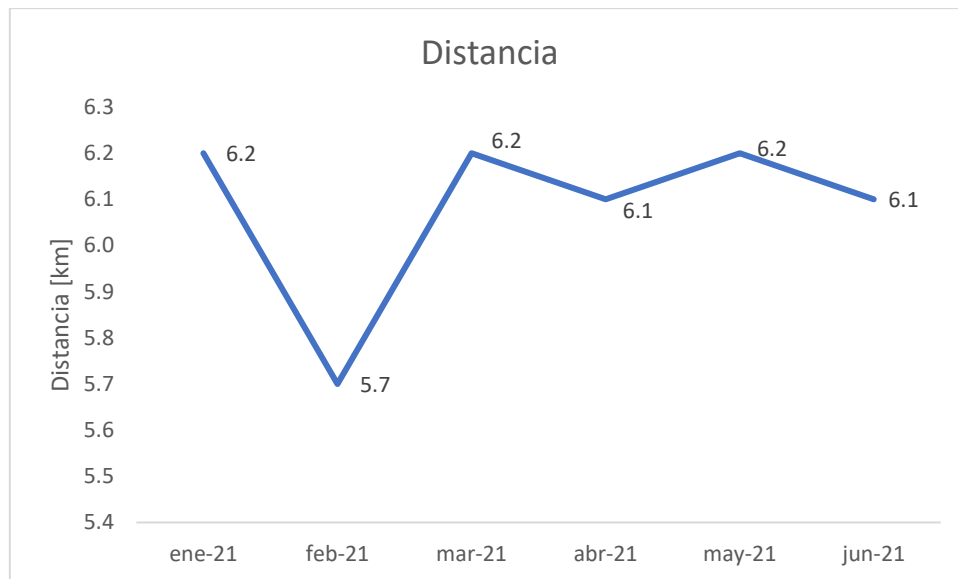


Figura 19: Distancia planificada para la flota Komatsu 930E-4SE.

- **Velocidad:** la planificación considera una velocidad promedio para recorridos cargados y vacíos, mostrado a continuación:

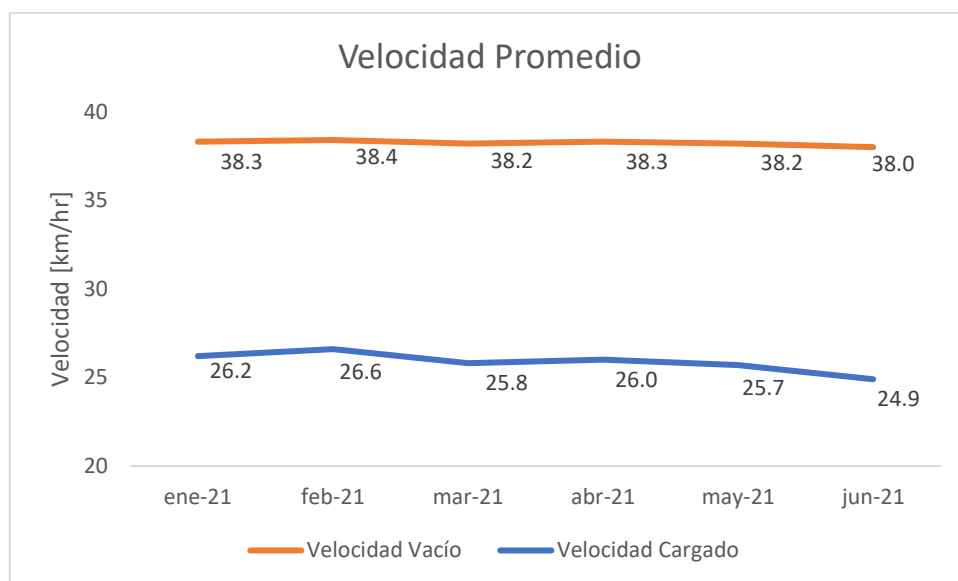


Figura 20: Velocidad vacío y cargado para la flota Komatsu 930E-4SE.

- **Parámetros de tiempo:** la planificación considera los siguientes parámetros relacionados a los tiempos del camión Komatsu 930E4-SE:

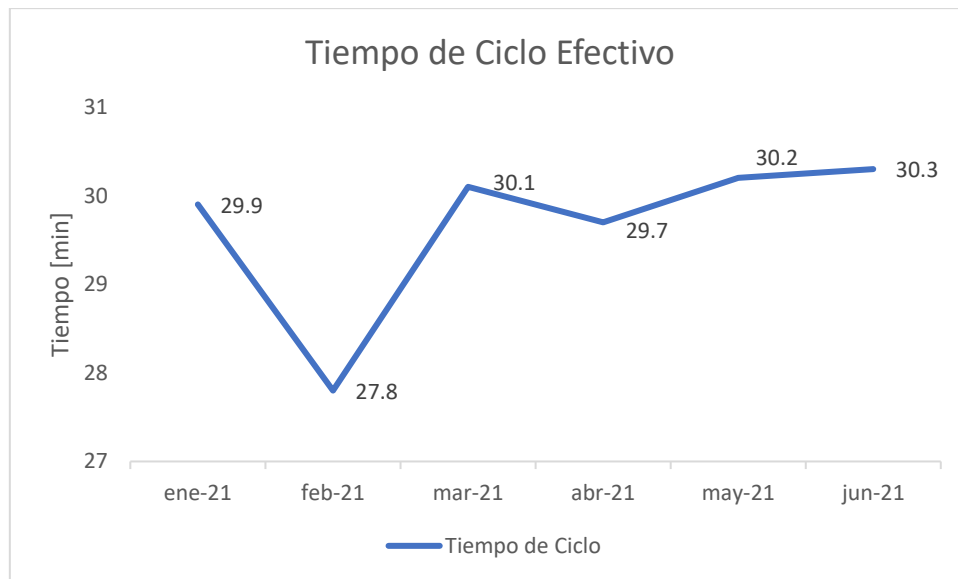


Figura 21: Tiempo de ciclo planificado para la flota Komatsu 930E-4SE.

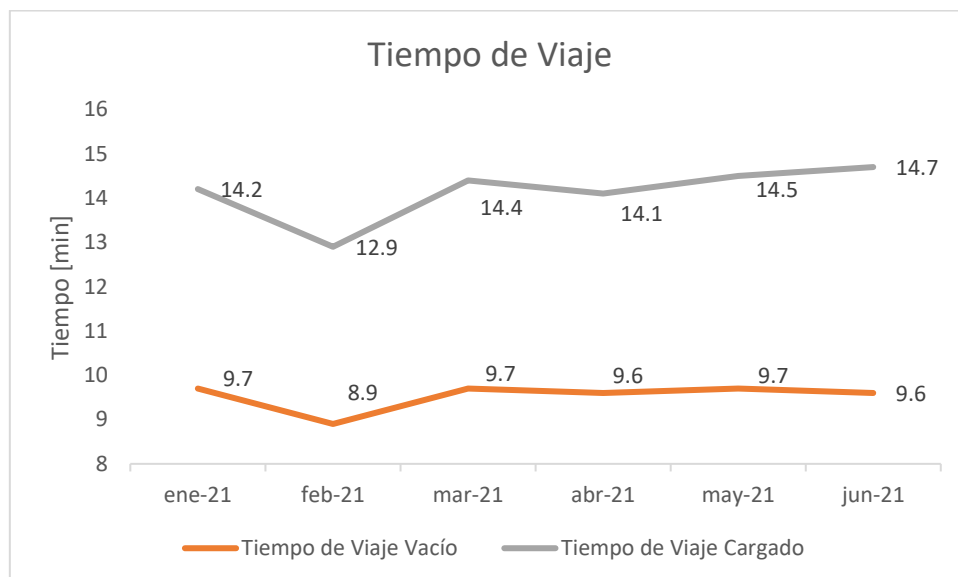


Figura 22: Tiempo de viaje vacío y cargado planificado para la flota Komatsu 930E-4SE.

En cuanto a los tiempos relacionados al aculatamiento en carga y descarga, y el tiempo cargando y descargando, la planificación considera el mismo valor para los meses de enero a junio de 2021.

Tabla 5: Parámetros de tiempo planificados para la flota de Komatsu 930E4-SE.

Parámetro	Unidad [min]
Aculatamiento en Carga	1,0
Tiempo Cargando	3,0
Aculatamiento en Descarga	1,0
Tiempo Descargando	1,0

- **KPI's operacionales planificados:** La planificación considera los siguientes parámetros relacionados al estado de los camiones Komatsu 930E4-SE para los meses de enero a junio de 2021:

Tabla 6: Parámetros de estado planificados para la flota de Komatsu 930E4-SE.

Parámetro	Unidad [%]
Disponibilidad BD⁶	75,9
UEBD	80,2
Fuera de Servicio	24,1
Pérdidas Operacionales BD	4,6
Demoras BD	2,9
Reservas BD	12,3

- **Norma ASARCO:** A partir de los parámetros de estados se desprende el siguiente modelo de uso de tiempo para los meses de enero a junio de 2021:

Horas Nominales		
24.0		
Horas Disponibles		Fuera de Servicio
18.2		5.8
Horas Operativas		Reservas
16.0		2.2
Horas Efectivas	PO	Demoras
14.6	0.8	0.5

Figura 23: Modelo de uso de tiempo resultante a partir de los parámetros de estados planificados para la flota de Komatsu 930E4-SE.

4.2 Parámetros Operacionales Reales de Mina

A partir de la información recibida del sistema de administración de flotas, se desprenden los parámetros operacionales de la mina en estudio para la flota de camiones Komatsu 930E-4SE durante el periodo de enero a junio del 2021. A continuación, se presentan dichos resultados:

1. Payload:

⁶ En base disponible

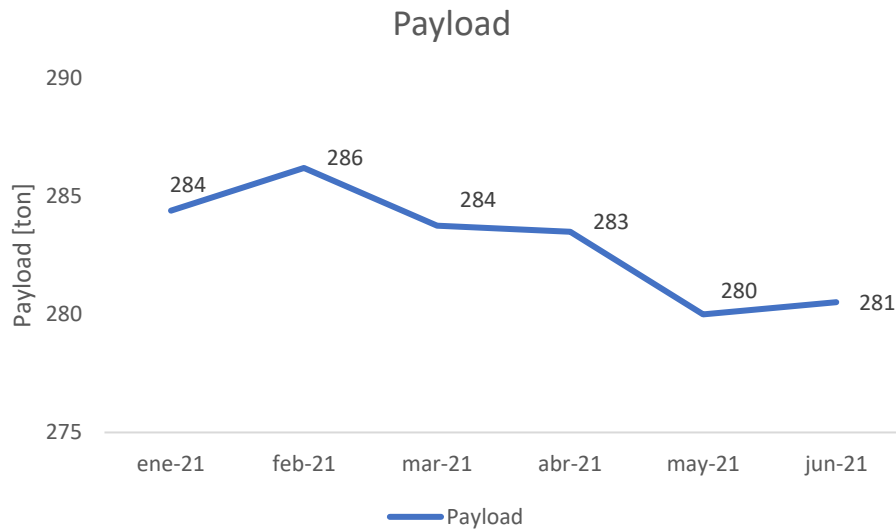


Figura 24: Payload mensual para la flota de Komatsu 930E-4SE.

En la Figura 24, se observa una tendencia decreciente en el *payload* durante los meses analizados, llegando a un mínimo de 280 [ton] en el mes de mayo.

2. Distancia:

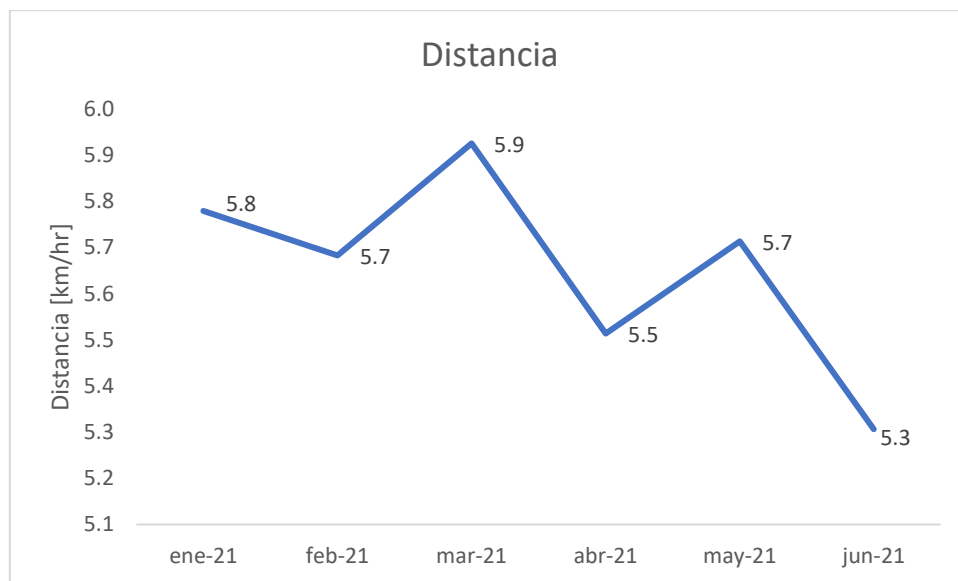


Figura 25: Distancia recorrida mensual para la flota de Komatsu 930E-4SE.

En la Figura 25, se observa la distancia recorrida por los camiones Komatsu 930E-4SE en el periodo analizado, llegando a un mínimo de 5,3 [km] en el mes de junio.

3. Velocidad:

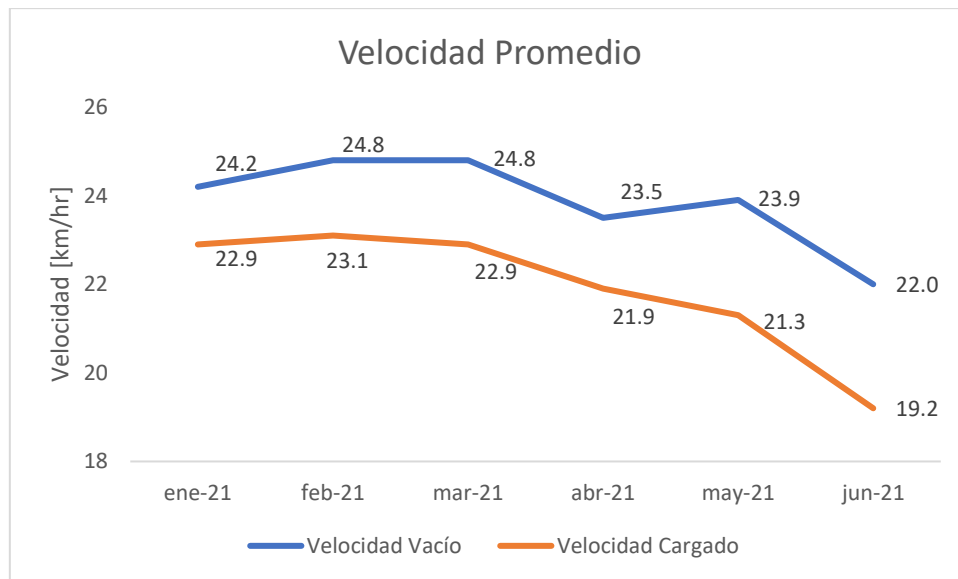


Figura 26: Velocidad vacío y cargado mensual para la flota de Komatsu 930E-4SE.

En la Figura 26, se presentan las velocidades promedio en vacío y cargado de los camiones Komatsu 930E-4SE, observándose una tendencia decreciente para ambas velocidades, llegando a una velocidad mínima vaciado de 22,0 [km/hr] y una velocidad mínima cargado de 19,2 [km/hr] en el mes de junio.

4. Tiempo de Ciclo Efectivo:

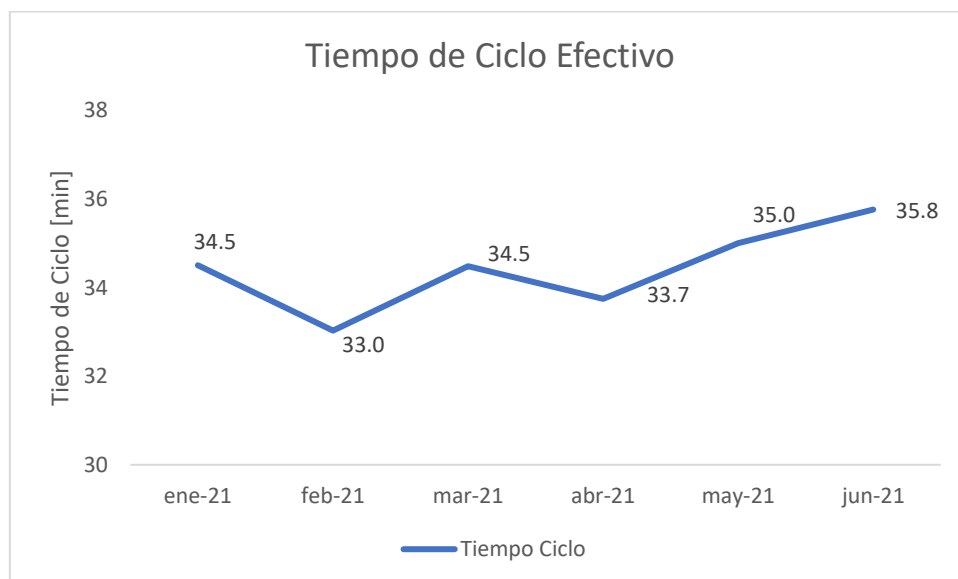


Figura 27: Tiempo de ciclo efectivo mensual para la flota de Komatsu 930E-4SE.

En la Figura 27, se observa una tendencia creciente del tiempo de ciclo, llegando a un máximo de 35,8 [min] en el mes de junio.

- **Desglose del tiempo de Ciclo Efectivo:**



Figura 28: Desglose del tiempo de ciclo efectivo de la flota Komatsu 930E-4SE para los periodos de análisis.

En la Figura 28, se observa el desglose del tiempo de ciclo para la flota Komatsu 930E-4SE en el periodo de análisis, donde se observa cierta regularidad en los tiempos fijos durante los meses de análisis. En cuanto al tiempo de viaje vacío, su valor ronda entre los 13,7 [min] y los 14,5 [min]. Mientras que el tiempo de viaje cargado, su valor ronda entre los 14,7 [min] y los 16,6 [min].

5. Estados del camión:

○ Disponibilidad y Utilización Efectiva:

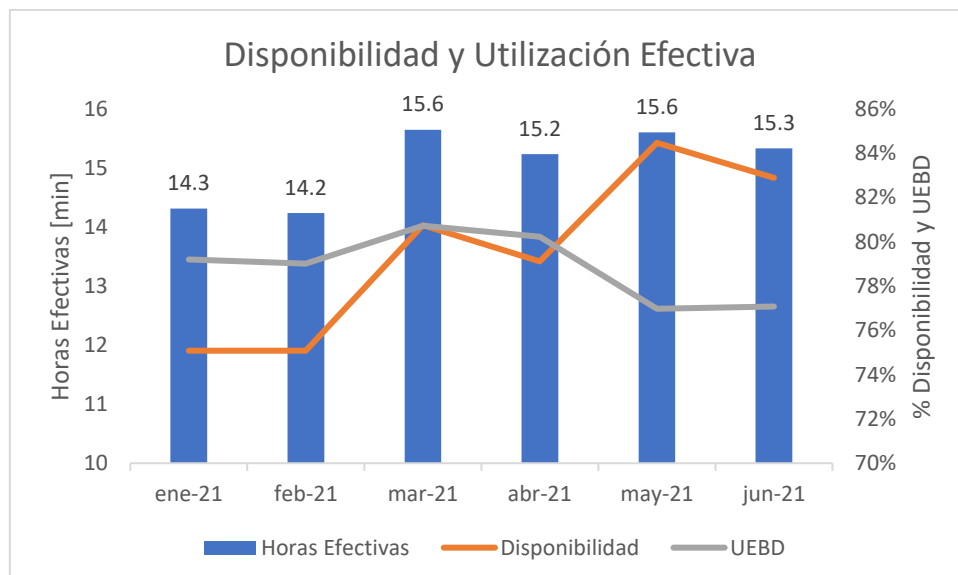


Figura 29: Horas efectivas, disponibilidad y UEBD de la flota Komatsu 930E4-SE para el periodo de análisis.

Como se observa en la Figura 29, la disponibilidad mantiene una tendencia creciente, que va desde el 75,1% en el mes de enero a los 82,9% en el mes de junio. Mientras que la utilización en base disponible se mantiene más estable durante el tiempo, pasando de un 79,2% en el mes de

enero, a un 77,1% en el mes de junio. Además, se observa una tendencia creciente de las horas efectivas, pasando de 14,3 [hrs] en el mes de enero, a 15,3 [hrs] en el mes de junio.

- **Fuera de Servicio:**

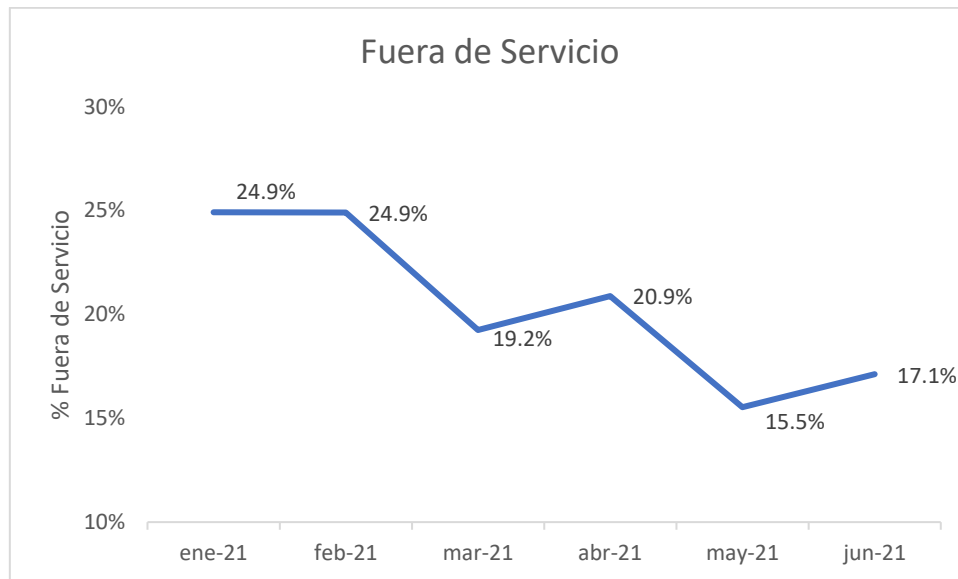


Figura 30: Fuera de servicio mensual para la flota de Komatsu 930E-4SE.

En la Figura 30Figura 29, se observa una tendencia decreciente del tiempo de fuera de servicio, el cual va desde un 24,9% en el mes de enero a un 17,1% en el mes de junio.

- **Pérdidas Operacionales (en base disponible):**

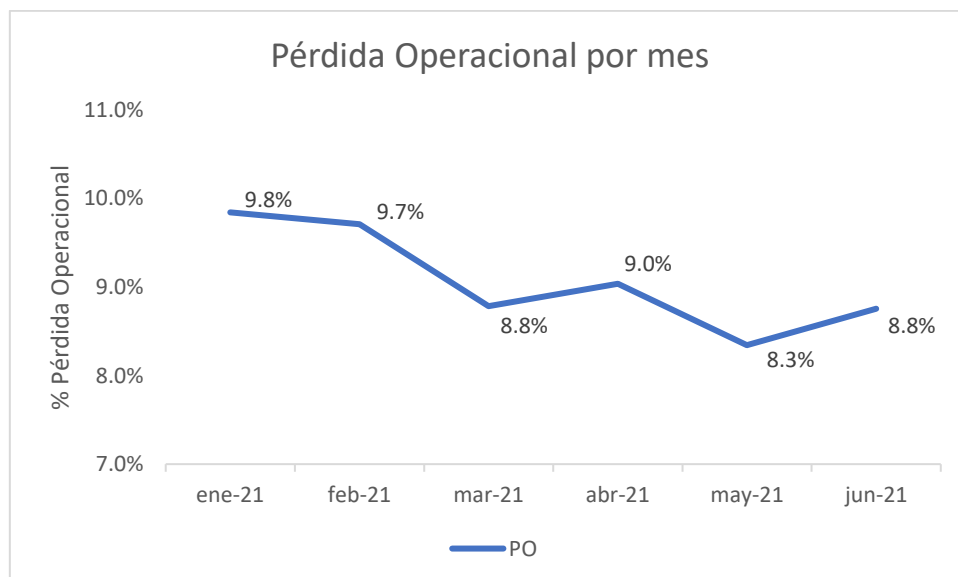


Figura 31: Pérdida operacional mensual para la flota de Komatsu 930E-4SE.

En la Figura 31, Figura 29se observa una tendencia decreciente de la pérdida operacional, la cual va desde un 9,8% en el mes de enero a un 8,8% en el mes de junio.

- **Demoras (en base disponible):**

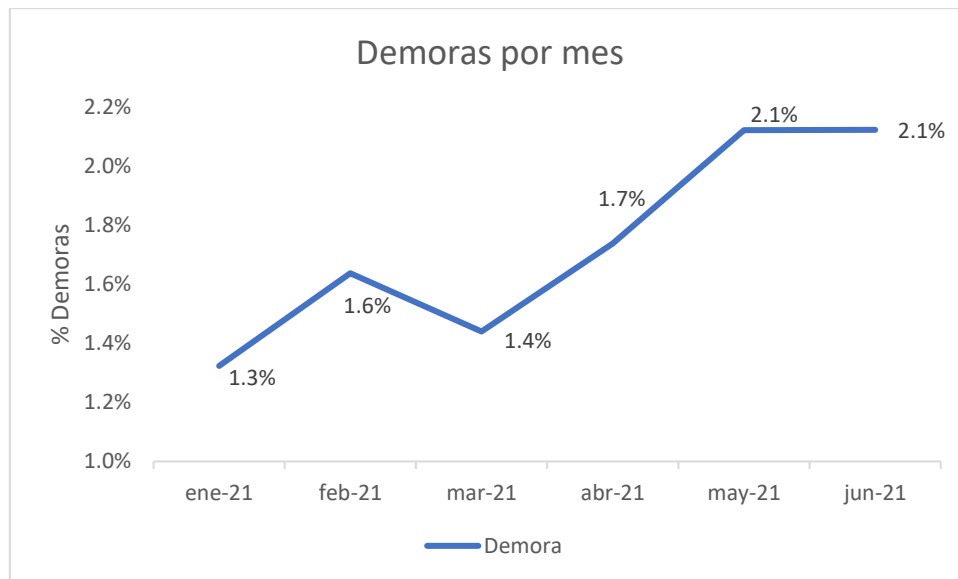


Figura 32: Demora mensual para la flota de Komatsu 930E-4SE.

En la Figura 32, se observa una tendencia creciente de la demora, la cual va desde un 1,3% en el mes de enero a un 2,1% en el mes de junio.

○ **Reservas (en base disponible):**

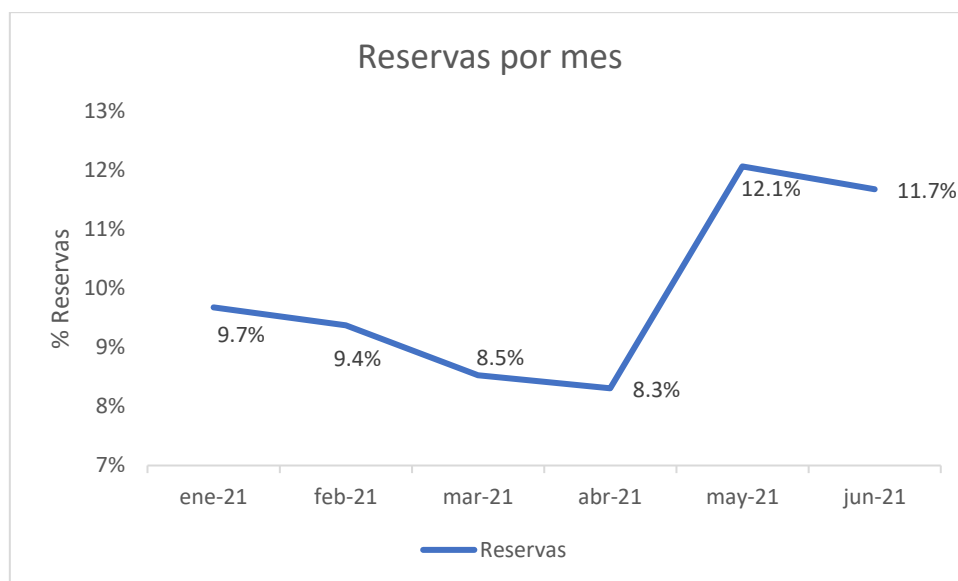


Figura 33: Reserva mensual para la flota de Komatsu 930E-4SE.

En la Figura 33, se observa que las reservas mantienen una tendencia decreciente los primeros cuatro meses, pasando de un 9,7% en el mes de enero a un 8,3% en el mes de abril, para luego pasar a un 11,7% en el mes de junio.

- **Norma ASARCO:** A partir de los parámetros de estados se desprende, el siguiente modelo de uso de tiempo para el mes de enero de 2021:

Horas Nominales		
24.0		
Horas Disponibles		Fuera de Servicio
18.0		6.0
Horas Operativas		Reservas
16.3		1.7
Horas Efectivas	PO	Demoras
14.3	1.8	0.2

Figura 34: Modelo de uso de tiempo resultante a partir de los parámetros de estados del mes de enero de 2021 para la flota de Komatsu 930E4-SE.

4.3 Brechas Operacionales

A partir de la obtención de los parámetros operacionales del periodo de enero a junio del 2021, se procede a aplicar la **Metodología Árbol de Valor**, con el fin de identificar las brechas operacionales que presenta la mina en estudio. La comparación se realiza entre los parámetros relacionados a la planificación de la mina del mes de enero de 2021 (ver **Parámetros Operacionales Planificados por Mina**) y los parámetros obtenidos en el mes de enero de 2021 (ver **Parámetros Operacionales Reales de Mina**). Esto se realiza en un mes puntual ya que lo que se busca es analizar la producción diaria de los camiones Komatsu 930E-4SE, representado por el tonelaje transportado al día por camión.

A continuación, se presenta los distintos niveles del Árbol de Valor, identificando distintas brechas en los parámetros operacionales del mes de enero:

I. Primer Nivel Árbol de Valor

El tonelaje transportado representa resultado del primer nivel del Árbol de Valor. Este se divide en tres categorías, *payload*, tiempo de ciclo y tiempo efectivo, cuya multiplicación entrega como resultado el tonelaje transportado al día por camión.

Para el caso de estudio, los tonelajes transportados planificados y reales se calculan según la ecuación (3.5), obteniendo las siguientes ecuaciones:

$$\text{Tonelaje Transportado}_{\text{plan}} \left[\frac{\text{ton}}{\text{día}} \right] = 292 \left[\frac{\text{ton}}{\text{vuelta}} \right] \div \left(29,9 \left[\frac{\text{min}}{\text{vuelta}} \right] \times \frac{1}{60} \left[\frac{\text{hrs}}{\text{min}} \right] \right) \times 14,6 \left[\frac{\text{hrs}}{\text{día}} \right] \approx 8.557 \left[\frac{\text{ton}}{\text{día}} \right] \quad (4.1)$$

$$\text{Tonelaje Transportado}_{\text{Real}} \left[\frac{\text{ton}}{\text{día}} \right] = 284 \left[\frac{\text{ton}}{\text{vuelta}} \right] \div \left(34,5 \left[\frac{\text{min}}{\text{vuelta}} \right] \times \frac{1}{60} \left[\frac{\text{hrs}}{\text{min}} \right] \right) \times 14,3 \left[\frac{\text{hrs}}{\text{día}} \right] \approx 7.054 \left[\frac{\text{ton}}{\text{día}} \right] \quad (4.2)$$

Al utilizar la metodología de Árbol de Valor propuesta, se obtiene para el primer nivel del modelo la siguiente figura:

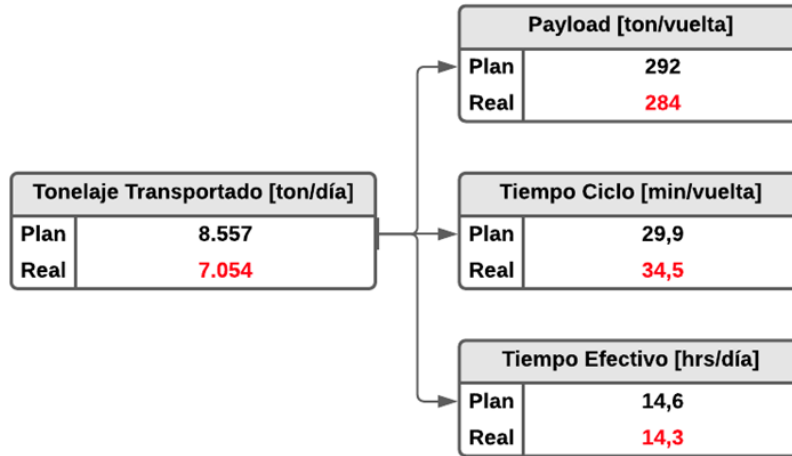


Figura 35: Primer nivel de Árbol de Valor.

Al utilizar la metodología de árbol de valor se pueden identificar de manera visual las brechas en el tonelaje transportado, *payload*, tiempo de ciclo y tiempo efectivo.

Para el caso del tonelaje transportado, la brecha operacional entre lo planificado y la data real del mes de enero de 2021 es de 1.503 [ton] equivalentes a un **17,6% de déficit** aproximadamente.

Al realizar el desglose del KPI principal se observa que para el caso del *payload*, la brecha operacional entre lo planificado y la data real es de 8 [ton/vuelta] equivalentes a un **2,7% de déficit**. En el caso del tiempo de ciclo, la brecha operacional entre lo planificado y la data real es de 4,6 [min/vuelta] equivalente a un **15,4% de déficit**. Finalmente, en el caso del tiempo efectivo, la brecha operacional entre lo planificado y la data real es de 0,3 [hrs/día] equivalente a un **2,1% de déficit**.

II. Segundo Nivel Árbol de Valor

Como se puede observar en la Figura 15 el segundo nivel del Árbol de Valor representa un desglose de los parámetros del primer nivel, en este caso del tiempo de ciclo y tiempo efectivo. A continuación, se observa el desglose de cada uno de estos parámetros con el fin de identificar de manera visual las brechas operacionales existentes.

6. Tiempo de ciclo:

Para el caso de estudio, los tiempos de ciclo planificados y reales son considerados como tiempo de ciclo efectivo, por lo que los tiempos de espera y cola no son considerados. Así, a partir de los resultados del mes de enero de 2021, se obtiene la Figura 36, lo cual queda representado además en las siguientes ecuaciones, resultantes de la ecuación (2.3).

$$Tiempo\ Ciclo_{Plan} \left[\frac{min}{vuelta} \right] = 9,7 \left[\frac{min}{vuelta} \right] + 1,0 \left[\frac{min}{vuelta} \right] + 3,0 \left[\frac{min}{vuelta} \right] + 14,2 \left[\frac{min}{vuelta} \right] + 1,0 \left[\frac{min}{vuelta} \right] + 1,0 \left[\frac{min}{vuelta} \right] = 29,9 \left[\frac{min}{vuelta} \right] \quad (4.3)$$

$$Tiempo\ Ciclo_{Real} \left[\frac{min}{vuelta} \right] = 14,4 \left[\frac{min}{vuelta} \right] + 1,0 \left[\frac{min}{vuelta} \right] + 2,1 \left[\frac{min}{vuelta} \right] + 15,2 \left[\frac{min}{vuelta} \right] + 1,0 \left[\frac{min}{vuelta} \right] + 0,8 \left[\frac{min}{vuelta} \right] = 34,5 \left[\frac{min}{vuelta} \right] \quad (4.4)$$

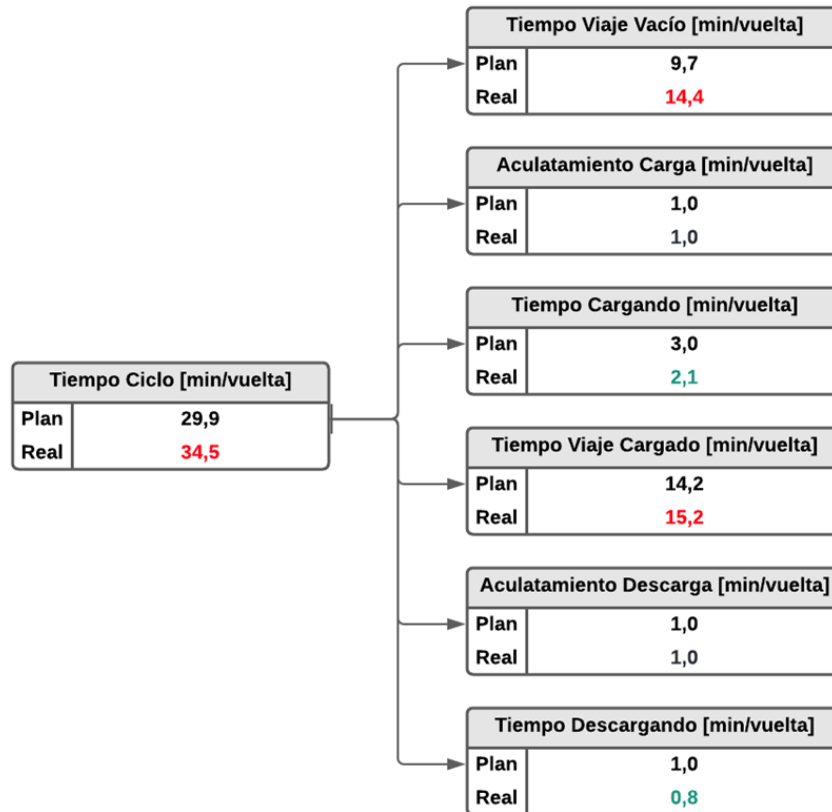


Figura 36: Segundo nivel de Árbol de Valor. Desglose del tiempo de ciclo efectivo.

Como se puede observar en la Figura 36, el segundo nivel del Árbol de Valor para el parámetro de tiempo de ciclo se divide en seis, tiempo de viaje vacío, acumulamiento en carga, tiempo cargando, tiempo de viaje cargado, acumulamiento en descarga y tiempo descargando.

De esto se desprende que el gran perjudicante en la brecha existente en el tiempo de ciclo es el tiempo de viaje vacío y cargado, ya que los demás tiempos reales resultan ser mejores o iguales a lo planificado.

Se observa que, para el caso del tiempo de viaje vacío, la brecha operacional entre lo planificado y la data real es de 4,7 [min/vuelta] equivalente a un **48,5% de déficit**, mientras que, para el tiempo de viaje cargado, la brecha operacional entre lo planificado y la data real es de 1,0 [min/vuelta] equivalente a un **7,0% de déficit**.

1. Tiempo Efectivo:

El desglose de los tiempos efectivos planificados y reales son obtenidos a partir de la información de enero de 2021, obteniendo la Figura 37, lo cual queda representado además en las siguientes ecuaciones, resultantes de la ecuación (A.3.1), obteniendo los siguientes resultados:

$$Tiempo\ efectivo_{Plan} [hrs] = 24 [hrs] \times \frac{75,9}{100} \times \frac{80,2}{100} \approx 14,6 [hrs] \quad (4.5)$$

$$Tiempo\ efectivo_{Real} [hrs] = 24 [hrs] \times \frac{75,1}{100} \times \frac{79,2}{100} \approx 14,3 [hrs] \quad (4.6)$$

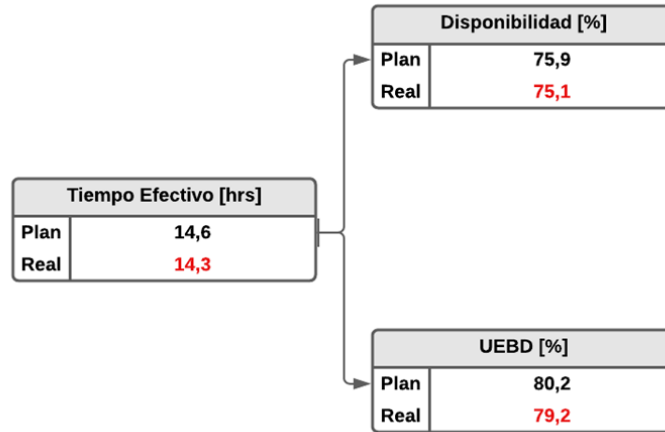


Figura 37: Segundo nivel de Árbol de Valor. Desglose del tiempo efectivo.

Como se puede observar en la Figura 37, el segundo nivel del Árbol de Valor para el parámetro de tiempo efectivo se divide en dos, disponibilidad y UEBD.

Al realizar el desglose del KPI principal se observa que para el caso de la disponibilidad, la brecha operacional entre lo planificado y la data real es de 0,8 p.p equivalente a **1,1% de déficit**. En el caso del UEBD, la brecha operacional entre lo planificado y la data real es de 1,0 p.p equivalente a un **1,2% de déficit**.

III. Tercer Nivel Árbol de Valor

Como se puede observar en la Figura 16, el tercer nivel del Árbol de Valor representa un desglose de los parámetros del segundo nivel, en este caso tiempos de viaje vacío y cargado, disponibilidad y UEBD.

2. Tiempo de Viaje Vacío y Cargado:

Para el caso de los tiempos relacionados al ciclo de transporte el tercer nivel quedaría constituido por parámetros no cuantificables (relacionados a la habilidad que debe tener el operador del camión y la pala), y parámetros de velocidad y distancia.

Al considerar para la metodología de Árbol de Valor solo parámetros cuantificables, los parámetros del tercer nivel solo estarían constituidos por la velocidad y la distancia, obtenidas a partir de la información de enero de 2021. Esto se observa en la Figura 38, lo cual queda representado además en las siguientes ecuaciones:

$$Tiempo\ Viaje\ Vacío_{Plan} \left[\frac{min}{vuelta} \right] = 6,2 \left[\frac{km}{vuelta} \right] \div \left(38,3 \left[\frac{km}{hr} \right] \div 60 \right) \approx 9,7 \left[\frac{min}{vuelta} \right] \quad (4.7)$$

$$Tiempo\ Viaje\ Vacío_{Real} \left[\frac{min}{vuelta} \right] = 5,8 \left[\frac{km}{vuelta} \right] \div \left(24,2 \left[\frac{km}{hr} \right] \div 60 \right) \approx 14,4 \left[\frac{min}{vuelta} \right] \quad (4.8)$$

$$Tiempo\ Viaje\ Cargado_{Plan} \left[\frac{min}{vuelta} \right] = 6,2 \left[\frac{km}{vuelta} \right] \div \left(26,2 \left[\frac{km}{hr} \right] \div 60 \right) \approx 14,2 \left[\frac{min}{vuelta} \right] \quad (4.9)$$

$$Tiempo\ Viaje\ Cargado_{Real} \left[\frac{min}{vuelta} \right] = 5,8 \left[\frac{km}{vuelta} \right] \div \left(26,2 \left[\frac{km}{hr} \right] \div 60 \right) \approx 15,2 \left[\frac{min}{vuelta} \right] \quad (4.10)$$

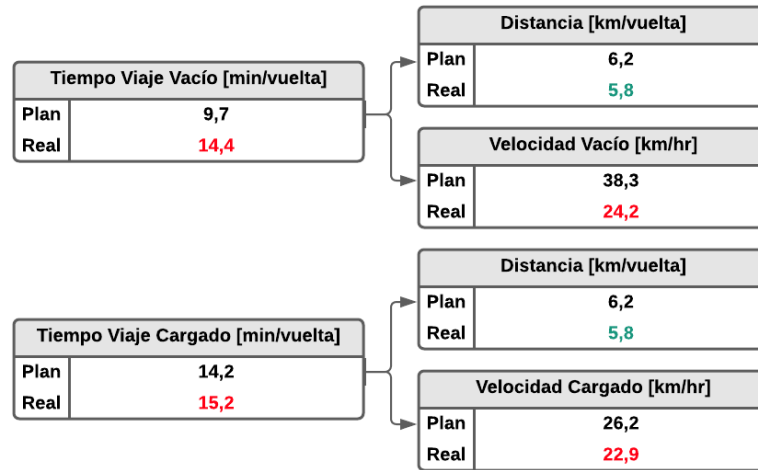


Figura 38: Tercer nivel de Árbol de Valor. Desglose del tiempo de viaje vacío y cargado.

Como se puede observar en la Figura 38, el tercer nivel del Árbol de Valor para los parámetros de tiempo de viaje vacío y cargado se divide en dos, distancia y velocidad vacío y cargado respectivamente.

La distancia recorrida, tanto en vacío y cargado es la misma, evidenciándose una brecha operacional de 0,4 [km] entre lo planificado y la data real, equivalente a un **6,5% de déficit**.

Para la velocidad en vacío, la brecha operacional entre lo planificado y la data real es de 14,1 [km/hr] equivalente a un **63,2% de déficit**, mientras que, para la velocidad cargado, la brecha operacional entre lo planificado y la data real es de 3,3 [km/hr] equivalente a un **2,6% de déficit**.

3. Disponibilidad y UEBD:

El desglose de disponibilidad y UEBD planificados y reales son obtenidos a partir de la información de enero de 2021, obteniendo la Figura 39Figura 37, lo cual queda representado además en las siguientes ecuaciones:

$$Disponibilidad_{Plan} [\%] = 100 [\%] - 24,1 [\%] = 75,9 [\%] \quad (4.11)$$

$$Disponibilidad_{Real} [\%] = 100 [\%] - 24,9 [\%] = 75,1 [\%] \quad (4.12)$$

$$UEBD_{Plan} [\%] = 100 [\%] - 4,6 [\%] - 2,9 [\%] - 12,3 [\%] = 80,2 [\%] \quad (4.13)$$

$$UEBD_{Real} [\%] = 100 [\%] - 9,8 [\%] - 1,3 [\%] - 9,7 [\%] = 79,2 [\%] \quad (4.14)$$

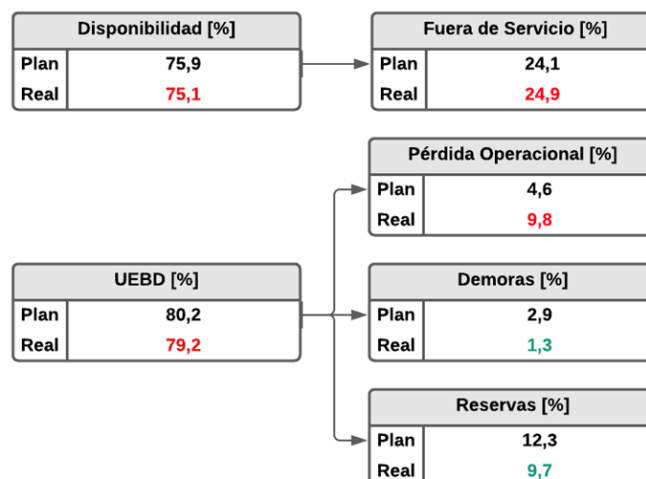


Figura 39: Tercer nivel de Árbol de Valor. Desglose de disponibilidad y UEBD.

Como se puede observar en la Figura 39, el tercer nivel del Árbol de Valor del parámetro de disponibilidad se desglosa en fuera de servicio, mientras que el UEBD se desglosa en tres, pérdidas operacionales, demoras y reservas.

Para el parámetro de fuera de servicio, la brecha operacional entre lo planificado y la data real es de 0,8 *p. p* equivalente a un **3,3% de déficit**.

Por otro lado, el parámetro de pérdidas operacionales presenta una brecha operacional entre lo planificado y la data real es de 5,2 *p. p* equivalente a un **113,0% de déficit**. En el caso de las demoras y reservas, la data real resulta ser mejor que la data planificada.

IV. Estructura Final Árbol de Valor

Así, la estructura final del Árbol de Valor para la flota de camiones Komatsu 930E-4SE, según parámetros operacionales planificados por la mina y parámetros obtenidos a través del sistema de gestión de flotas del mes de enero de 2021, se presenta a continuación.

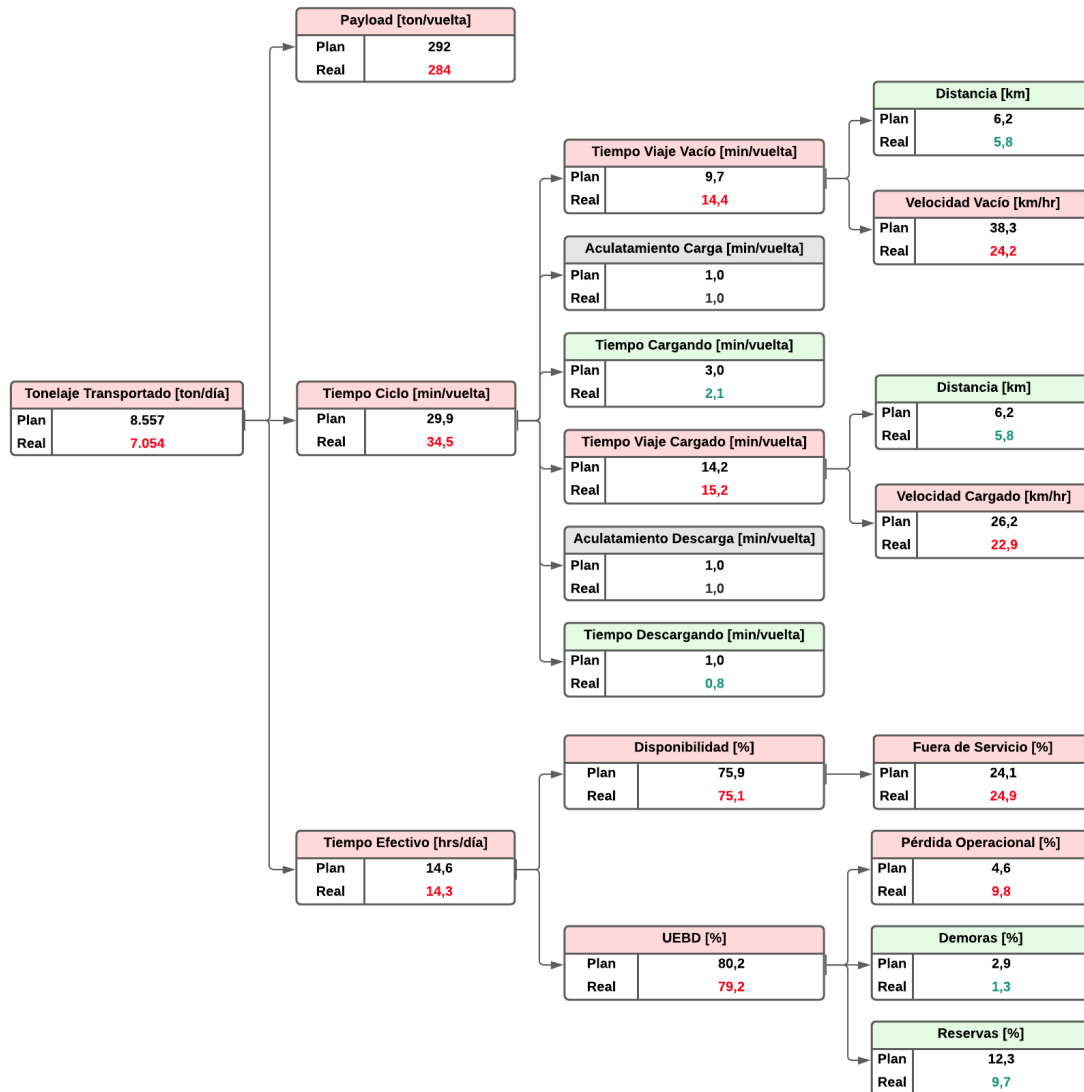


Figura 40: Estructura final de Árbol de Valor para el caso de estudio.

En la Figura 40 se pueden observar las brechas positivas y negativas (representadas por el color verde y rojo respectivamente) que tienen los distintos parámetros operacionales, resultando en una brecha negativa en el tonelaje transportado al día por camión. Esta brecha operacional entre el tonelaje transportado planificado y el real del mes de enero de 2021 es de 1.503 [ton] equivalente a un **17,6% de déficit**.

V. Análisis de Impacto

Siguiendo con la **Metodología Árbol de Valor**, el siguiente paso consiste en realizar el análisis de impacto, donde se busca visualizar de manera rápida y eficaz el efecto que tiene cada parámetro operacional del Árbol de Valor en el KPI principal.

A modo de ejemplo, se realiza el análisis de impacto para el primer nivel del árbol de valor:

1. Se utilizan como base de comparación los parámetros operacionales planificados de la mina en estudio del mes de enero de 2021.
2. Se varía solo el valor de uno de los parámetros operacionales planificados por su valor real respectivo, obteniendo un nuevo tonelaje transportado al día por camión. A modo de

ejemplo se realiza el ejercicio variando el valor planificado del *payload* de 292 [ton] por su valor real de 284 [ton].

$$\text{Tonelaje Transportado}_{\Delta \text{Payload}} \left[\frac{\text{ton}}{\text{día}} \right] = 284 \left[\frac{\text{ton}}{\text{vuelta}} \right] \div \left(29,9 \left[\frac{\text{min}}{\text{vuelta}} \right] \times \frac{1}{60} \left[\frac{\text{hrs}}{\text{min}} \right] \right) \times 14,6 \left[\frac{\text{hrs}}{\text{día}} \right] \approx 8.323 \left[\frac{\text{ton}}{\text{día}} \right] \quad (4.15)$$

A continuación, se calcula el impacto que genera este parámetro (*payload*) en el KPI principal:

$$\text{Impacto}_{\text{Payload}} [\%] = \frac{\left(8.323 \left[\frac{\text{ton}}{\text{día}} \right] - 8.557 \left[\frac{\text{ton}}{\text{día}} \right] \right)}{8.557 \left[\frac{\text{ton}}{\text{día}} \right]} \times 100 [\%] \approx -2,7 [\%] \quad (4.16)$$

3. Repitiendo este ejercicio para los demás parámetros del primer nivel del Árbol de Valor, se obtiene un impacto para el *payload*, tiempo de ciclo y tiempo efectivo de (-2,7%), (-13,3%) y (-2,3%) respectivamente.
4. El siguiente paso es **calcular el impacto ajustado** de cada parámetro. A modo de ejemplo, se realiza este ejercicio con el parámetro *payload*:

$$\text{Impacto Ajustado}_{\text{Payload}} [\%] = (-2,7 [\%] \times -17,6 [\%]) \div -18,3 [\%] \approx -2,7 [\%] \quad (4.17)$$

5. Repitiendo este ejercicio para los demás parámetros del primer nivel del Árbol de Valor, se obtiene un impacto ajustado para el *payload*, tiempo de ciclo y tiempo efectivo de (-2,7%), (-12,7%) y (-2,2%) respectivamente, donde la suma de estos resulta en (-17,6%), siendo equivalente al déficit obtenido a partir de la metodología de Árbol de Valor. Cabe destacar que este impacto ajustado se denominara como “impacto”.
6. A continuación, se calcula el **impacto en base cien por ciento**, facilitando aún más la visualización de los resultados. A modo de ejemplo, se realiza este ejercicio con el parámetro *payload*:

$$\text{Impacto Payload}_{\text{Base } 100\%} [\%] = (-2,7 [\%] \times -100 [\%]) \div -17,6 [\%] \approx -14,9 [\%] \quad (4.18)$$

7. Repitiendo este ejercicio para los demás parámetros del primer nivel del Árbol de Valor, se obtiene un impacto en base cien por ciento para el *payload*, tiempo de ciclo y tiempo efectivo de (-14,9%), (-72,5%) y (-12,6%) respectivamente, donde la suma de estos resulta en un (-100%).
8. Este ejercicio se repite en los siguientes niveles del Árbol de Valor, tomando como base el impacto del parámetro del nivel anterior.

Cabe destacar que un porcentaje negativo representa el impacto en el KPI principal que genera el valor real del parámetro operacional al no alcanzar el valor esperado por el plan, mientras que un porcentaje positivo representa el impacto en el KPI principal que genera el valor real al ser mejor al valor esperado por el plan.

Los resultados de esta metodología de cálculo se presentan en las siguientes tablas (separadas según el nivel del Árbol de Valor), donde se observa de izquierda a derecha el parámetro operacional, valor planificado, valor real, nuevo tonelaje transportado (resultante al utilizar el valor real y dejando los demás parámetros según lo planificado), la variación del tonelaje transportado (resultante de la resta entre el nuevo tonelaje transportado y el tonelaje transportado planificado de 8.557 [ton/día], representado por $\Delta \text{Tonelaje Transportado}$), impacto en porcentaje que genera el parámetro operacional real en el tonelaje transportado, e impacto en base cien por ciento.

I. Primer Nivel Árbol de Valor

Tabla 7: Impacto generado en el tonelaje transportado por parámetros operacionales del primer nivel del Árbol de Valor.

Parámetro Operacional	Unidad	Valor Plan	Valor Real	Nuevo Tonelaje Transportado [ton/día]	ΔTonelaje Transportado [ton/día]	Impacto %	Impacto Base 100%
Payload	[ton]	292	284	8.323	-234	-2,7	-14,9
T. Ciclo	[min]	29,9	34,5	7.423	-1.134	-12,7	-72,5
T. Efectivo	[hr/día]	14,6	14,3	8.361	-196	-2,2	-12,6
Total						-17,6	-100%

A partir de la Tabla 7, se desprende que el parámetro operacional del primer nivel del Árbol de Valor que genera un mayor impacto en el tonelaje transportado es el tiempo de ciclo, observándose una disminución de 1.134 [ton/día] en el tonelaje transportado, equivalente a un **impacto de (-12,7%)** o un **impacto en base cien por ciento de (-72,5%)**. Seguido por el *payload*, el cual genera una disminución de 234 [ton/día] en el tonelaje transportado, equivalente a un **impacto de (-2,7%)** o un **impacto en base cien por ciento de (-14,9%)**, y finalmente el tiempo efectivo, el cual genera una disminución de 196 [ton/día] en el tonelaje transportado, equivalente a un **impacto de (-2,2%)** o un **impacto en base cien por ciento de (-12,6%)**. Para identificar en mayor detalle el impacto en el KPI principal es necesario observar el siguiente nivel del Árbol de Valor. La suma de los impactos del primer nivel resulta en el impacto total en el tonelaje transportado, equivalente a (-17,6%).

II. Segundo Nivel Árbol de Valor

Tabla 8: Impacto generado en el tonelaje transportado por la variación de parámetros operacionales del segundo nivel del Árbol de Valor relacionados al tiempo de ciclo.

Parámetro Operacional	Unidad	Valor Plan	Valor Real	Nuevo Tonelaje Transportado [ton/día]	ΔTonelaje Transportado [ton/día]	Impacto %	Impacto Base 100%
T. Viaje Vacío	[min]	9,7	14,4	7.398	-1.159	-13,3	-75,9
Acul. Carga	[min]	1,0	1,0	8.557	-	-	-
T. Cargando	[min]	3,0	2,1	8.823	+265	+3,0	+17,4
T. Viaje Cargado	[min]	14,2	15,2	8.285	-272	-3,1	-17,8
Acul. Descarga	[min]	1,0	1,0	8.557	-	-	-
T. Descargando	[min]	1,0	0,8	8.615	+58	+0,7	+3,8
Total						-12,7	-72,5

La Tabla 8 presenta el segundo nivel del Árbol de Valor relacionado al desglose del tiempo de ciclo, del cual se desprende que el parámetro operacional que genera un mayor impacto en el tonelaje transportado es el tiempo de viaje vacío, observándose una disminución de 1.159 [ton/día] en el tonelaje transportado, equivalente a un **impacto de (-13,3%)** o un **impacto en base cien por ciento de (-75,9%)**. La suma del impacto del segundo nivel respecto al tiempo de

ciclo resulta en el impacto total del tiempo de ciclo, equivalente a (-12,7%) o un impacto en base cien por ciento de (-72,5%).

Tabla 9: Impacto generado en el tonelaje transportado por la variación de parámetros operacionales del segundo nivel del Árbol de Valor relacionados al tiempo efectivo.

Parámetro Operacional	Unidad	Valor Plan	Valor Real	Nuevo Tonelaje Transportado [ton/día]	ΔTonelaje Transportado [ton/día]	Impacto %	Impacto Base 100%
Disponibilidad	%	75,9	75,1	8.467	-90	-1,0	-5,7
UEBD	%	80,2	79,2	8.450	-107	-1,2	-6,9
Total						-2,2	-12,6

La Tabla 9 presenta el segundo nivel del Árbol de Valor relacionado al desglose del tiempo efectivo, del cual se desprende que el parámetro operacional que genera un mayor impacto en el tonelaje transportado es el UEBD, observándose una disminución de 107 [ton/día] en el tonelaje transportado, equivalente a un **impacto de (-1,2%)** o un **impacto en base cien por ciento de (-6,9%)**. La suma del impacto del segundo nivel respecto al tiempo efectivo resulta en el impacto total del tiempo efectivo, equivalente a (-2,2%) o un impacto en base cien por ciento de (-12,6%).

Siguiendo con el ejercicio, se procede a observar el impacto generado por los parámetros operacionales del tercer nivel del Árbol de Valor.

II. Tercer Nivel Árbol de Valor

Tabla 10: Impacto generado en el tonelaje transportado por la variación de parámetros operacionales del tercer nivel del Árbol de Valor relacionados al tiempo de viaje vacío y cargado.

Parámetro Operacional	Unidad	Valor Plan	Valor Real	Nuevo Tonelaje Transportado [ton/día]	ΔTonelaje Transportado [ton/día]	Impacto %	Impacto Base 100%
Dist. Vacío	[km]	6,2	5,8	8.740	+183	+2,1	+11,7
Veloc. Vacío	[km/hr]	38,3	24,2	7.191	-1.366	-15,4	-86,6
Total						-13,3	-75,9
Dist. Cargado	[km]	6,2	5,8	8.827	+270	+3,1	+17,6
Veloc. Cargado	[km/hr]	26,2	22,9	8.013	-544	-6,2	-35,4
Total						-3,1	-17,8

La Tabla 10 presenta el tercer nivel del Árbol de Valor relacionado al desglose del tiempo de viaje vacío y cargado. Por el lado del tiempo de viaje vacío, el parámetro operacional que genera un mayor impacto en el tonelaje transportado es la velocidad vacío del camión, observándose una disminución de 1.366 [ton/día] en el tonelaje transportado, equivalente a un **impacto de (-15,4%)** o un **impacto en base cien por ciento de (-86,6%)**. La suma del impacto del tercer nivel

respecto al tiempo de viaje vacío resulta en el impacto total del tiempo de viaje vacío, equivalente a (-13,3%) o un impacto en base cien por ciento de (-75,9%).

En cuanto al tiempo de viaje cargado, el parámetro operacional que genera un mayor impacto en el tonelaje transportado es la velocidad del camión cargado, observándose una disminución de 544 [ton/día] en el tonelaje transportado, equivalente a un **impacto de (-6,2%)** o un **impacto en base cien por ciento de (-35,4%)**. La suma del impacto del tercer nivel respecto al tiempo de viaje cargado resulta en el impacto total del tiempo de viaje cargado, equivalente a (-3,1%) o un impacto en base cien por ciento de (-17,8%).

Tabla 11: Impacto generado en el tonelaje transportado por la variación de parámetros operacionales del tercer nivel del Árbol de Valor relacionados a la disponibilidad y al UEBD.

Parámetro Operacional	Unidad	Valor Plan	Valor Real	Nuevo Tonelaje Transportado [ton/día]	ΔTonelaje Transportado [ton/día]	Impacto %	Impacto Base 100%
Fuera de Servicio	%	24,1	24,9	8.467	-90	-1,0	-5,7
Total						-1,0	-5,7
Pérdidas Operacionales	%	4,6	9,8	8.002	-555	-6,2	-35,3
Demoras	%	2,9	1,3	8.728	+171	+1,9	+10,8
Reservas	%	12,3	9,7	8.835	+277	+3,1	+17,6
Total						-1,2	-6,9

La Tabla 11 presenta el tercer nivel del Árbol de Valor relacionado al desglose de la disponibilidad y el UEBD. Por el lado de la disponibilidad, el único parámetro operacional que genera un impacto en el tonelaje transportado es el fuera de servicio, observándose una disminución de 90 [ton/día] en el tonelaje transportado, equivalente a un **impacto de (-1,0%)** o un **impacto en base cien por ciento de (-5,7%)**. La suma del impacto del tercer nivel respecto a la disponibilidad resulta en el impacto total de la disponibilidad, equivalente a (-1,0%) o un impacto en base cien por ciento de (-5,7%).

En cuanto al UEBD, el parámetro operacional que genera un mayor impacto en el tonelaje transportado son las pérdidas operacionales, observándose una disminución de 555 [ton/día] en el tonelaje transportado, equivalente a un **impacto de (-6,2%)** o un **impacto en base cien por ciento de (-35,3%)**. La suma del impacto del tercer nivel respecto al UEBD resulta en el impacto total del UEBD, equivalente a (-1,2%) o un impacto en base cien por ciento de (-6,9%).

Así, la estructura final del Árbol de Valor, donde se detalla el impacto de cada parámetro operacional sobre el tonelaje transportado al día por camión, se presenta a continuación:

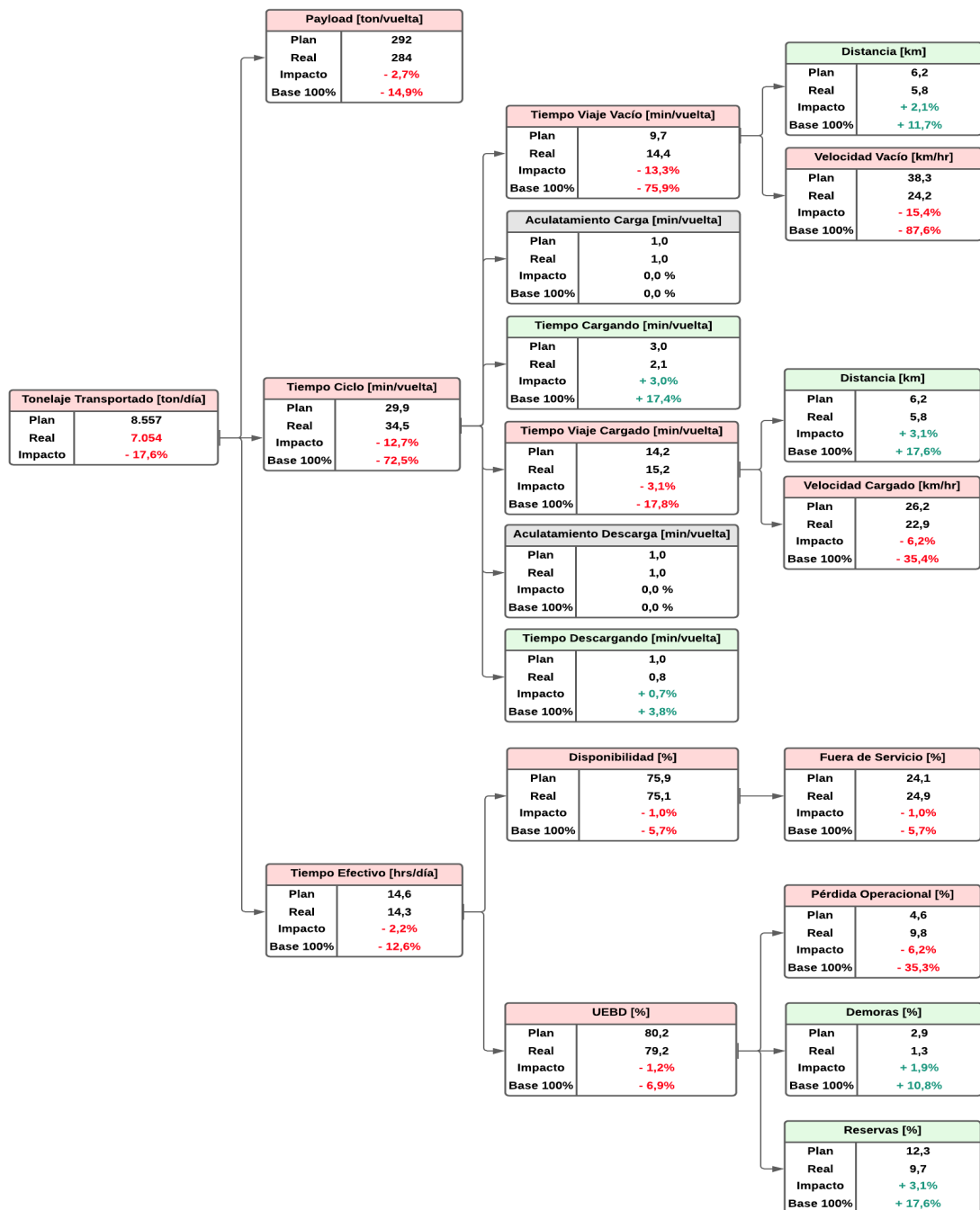


Figura 41: Estructura final de Árbol de Valor donde se detalla el impacto de cada parámetro operacional en el tonelaje transportado al día por camión.

La Figura 41: Estructura final de Árbol de Valor donde se detalla el impacto de cada parámetro operacional en el tonelaje transportado al día por camión. Figura 41 permite visualizar las brechas operacionales existentes entre los parámetros planificados y reales, además de su respectivo impacto en el tonelaje transportado al día por camión, del cual se desprende que el parámetro operacional que genera el **mayor impacto en el tonelaje transportado está relacionado al tiempo de ciclo del camión**, que **representa un (-72,5%) de la brecha total del tonelaje transportado**. El tiempo de viaje vacío equivale al (-75,9%) de la baja en el tiempo de ciclo y el (-87,6%) del impacto en el tiempo de viaje vacío está representada por la velocidad en vacío.

4.3.1 Sensibilización de Resultados

Se entiende como sensibilización al procedimiento por medio del cual se puede determinar el impacto que tiene cada parámetro sobre el KPI principal al variarlos en una misma magnitud. Esto se realiza para identificar de manera general el impacto que genera la variación de los parámetros operacionales en el tonelaje transportado al día por camión, ya que cada parámetro variaría en una misma medida.

Para este caso, la sensibilización se realizará con una variación en contra del 10% en los valores de cada parámetro operacional planificado de la mina en estudio, observando así, su impacto en el tonelaje transportado. Esto se realiza de la siguiente manera:

1. Se utiliza como base los parámetros operacionales planificados del mes de enero de 2021.
2. Se varía el valor de un parámetro operacional por el valor real respectivo del mes de enero de 2021 y se registra el impacto que genera en el tonelaje transportado por día.
3. Se restablece el valor del plan, y se repite el análisis sucesivamente para cada parámetro operacional.

A modo de ejemplo, las siguientes ecuaciones muestran el impacto que genera en el tonelaje transportado al variar solo el *payload* planificado de 292 [ton] a 284 [ton] (*payload* real de enero de 2021), dejando los demás parámetros fijos según lo planificado en enero de 2021.

$$\text{Tonelaje Transportado} \left[\frac{\text{ton}}{\text{día}} \right] = 263 \left[\frac{\text{ton}}{\text{vuelta}} \right] \div \left(29,9 \left[\frac{\text{min}}{\text{vuelta}} \right] \times \frac{1}{60} \left[\frac{\text{hrs}}{\text{min}} \right] \right) \times 14,6 \left[\frac{\text{hrs}}{\text{día}} \right] = 7.701 \left[\frac{\text{ton}}{\text{día}} \right] \quad (4.19)$$

$$\text{Impacto}_{\text{Payload}} [\%] = \frac{\left(\text{Tonelaje Transportado}_{\Delta \text{Payload}} \left[\frac{\text{ton}}{\text{día}} \right] - \text{Tonelaje Transportado}_{\text{plan}} \left[\frac{\text{ton}}{\text{día}} \right] \right)}{\text{Tonelaje Transportado}_{\text{plan}} \left[\frac{\text{ton}}{\text{día}} \right]} \times 100 [\%] \quad (4.20)$$

$$\text{Impacto}_{\text{Payload}} [\%] = \frac{\left(7.701 \left[\frac{\text{ton}}{\text{día}} \right] - 8.557 \left[\frac{\text{ton}}{\text{día}} \right] \right)}{8.557 \left[\frac{\text{ton}}{\text{día}} \right]} \times 100 [\%] \approx -10,0 [\%] \quad (4.21)$$

Cabe destacar que un porcentaje negativo representa el impacto en el KPI principal que genera el valor real del parámetro operacional al no alcanzar el valor esperado por el plan, mientras que un porcentaje positivo representa el impacto en el KPI principal que genera el valor real al ser mejor al valor esperado por el plan.

Los resultados de esta metodología de cálculo se presentan en las siguientes tablas (separadas según el nivel del árbol de valor), donde se observa de izquierda a derecha el parámetro operacional, valor planificado, valor sensibilizado en un 10,0% en contra, nuevo tonelaje transportado (utilizando el valor sensibilizado y dejando los demás parámetros según lo planificado), la variación del tonelaje transportado (resultante de la resta entre el nuevo tonelaje transportado y el tonelaje transportado planificado de 8.557 [ton/día], representado por $\Delta \text{Tonelaje Transportado}$) y el impacto en porcentaje que genera el parámetro operacional sensibilizado en el tonelaje transportado al día por camión.

I. Primer Nivel Árbol de Valor

Tabla 12: Impacto generado en el tonelaje transportado por parámetros del primer nivel del Árbol de valor al realizar una variación sensibilizada.

Parámetro Operacional	Unidad	Valor Plan	Valor $\pm 10\%$	Nuevo Tonelaje Transportado [ton/día]	$\Delta \text{Tonelaje Transportado}$ [ton/día]	Impacto %
Payload	[ton]	292	263	7.701	-856	-10,0
T. Ciclo	[min]	29,9	32,9	7.779	-778	-9,1

T. Efectivo	[hr/día]	14,6	13,1	7.701	-856	-10,0
--------------------	-----------------	------	------	-------	------	-------

A partir de la Tabla 12, se desprende que los parámetros operacionales del primer nivel del Árbol de Valor que generan un **mayor impacto en el tonelaje transportado es el payload y el tiempo efectivo**, los cuales impactan directamente en el tonelaje transportado, observándose una disminución de 856 [ton/día] en el tonelaje transportado para ambos casos, equivalente a un **impacto de (-10,0%)**. Por otro lado, el tiempo de ciclo el cual genera una disminución de 778 [ton/día] en el tonelaje transportado, equivalente a un **impacto de (-9,1%)**. Para identificar en mayor detalle el impacto en el KPI principal es necesario observar el siguiente nivel del Árbol de Valor.

II. Segundo Nivel Árbol de Valor

Tabla 13: Impacto generado en el tonelaje transportado por la variación de parámetros operacionales del segundo nivel del Árbol de Valor relacionados al tiempo de ciclo al realizar una variación sensibilizada.

Parámetro Operacional	Unidad	Valor Plan	Valor +10%	Nuevo Tonelaje Transportado [ton/día]	ΔTonelaje Transportado [ton/día]	Impacto %
T. Viaje Vacío	[min]	9,7	10,7	8.288	-269	-3,1
Acul. Carga	[min]	1,0	1,1	8.529	-29	-0,3
T. Cargando	[min]	3,0	3,3	8.472	-85	-1,0
T. Viaje Cargado	[min]	14,2	15,6	8.169	-388	-4,5
Acul. Descarga	[min]	1,0	1,1	8.529	-29	-0,3
T. Descargando	[min]	1,0	1,1	8.529	-29	-0,3

La Tabla 13 presenta el segundo nivel del Árbol de Valor relacionado al desglose del tiempo de ciclo, del cual se desprende que el parámetro operacional que genera un **mayor impacto en el tonelaje transportado es el tiempo de viaje cargado**, observándose una disminución de 388 [ton/día] en el tonelaje transportado, equivalente a un **impacto de (-4,5%)**.

Tabla 14: Impacto generado en el tonelaje transportado por la variación de parámetros operacionales del segundo nivel del Árbol de Valor relacionados al tiempo efectivo al realizar una variación sensibilizada.

Parámetro Operacional	Unidad	Valor Plan	Valor -10%	Nuevo Tonelaje Transportado [ton/día]	ΔTonelaje Transportado [ton/día]	Impacto %
Disponibilidad	%	75,9	68,3	7.701	-856	-10,0
UEBD	%	80,2	72,2	7.701	-856	-10,0

La Tabla 14 presenta el segundo nivel del Árbol de Valor relacionado al desglose del tiempo efectivo, al ser la disponibilidad y el UEBD parámetros operacionales que afectan directamente en el tiempo efectivo, la disminución que generan en el tonelaje transportado ambos parámetros es de 856 [ton/día], equivalente a un **impacto de (-10,0%)**.

Siguiendo con el ejercicio, se procede a observar el impacto generado por los parámetros operacionales del tercer nivel del Árbol de Valor.

III. Tercer Nivel Árbol de Valor

Tabla 15: Impacto generado en el tonelaje transportado por la variación de parámetros operacionales del tercer nivel del Árbol de Valor relacionados al tiempo de viaje vacío y cargado al realizar una variación sensibilizada.

Parámetro Operacional	Unidad	Valor Plan	Valor $\pm 10\%$	Nuevo Tonelaje Transportado [ton/día]	Δ Tonelaje Transportado [ton/día]	Impacto %
Dist. Vacío	[km]	6,2	6,8	8.288	-269	-3,1
Veloc. Vacío	[km/hr]	38,3	34,5	8.259	-298	-3,5
Dist. Cargado	[km]	6,2	6,8	8.169	-388	-4,5
Veloc. Cargado	[km/hr]	26,2	23,6	8.128	-429	-5,0

La Tabla 15 presenta el tercer nivel del Árbol de Valor relacionado al desglose del tiempo de viaje vacío y cargado. Por el lado del tiempo de viaje vacío, el parámetro operacional que genera un mayor impacto en el tonelaje transportado es la velocidad vacío del camión, observándose una disminución 298 [ton/día] en el tonelaje transportado, equivalente a un **impacto de (-3,5%)**. En cuanto al tiempo de viaje cargado, el parámetro operacional que genera un mayor impacto en el tonelaje transportado es la velocidad cargado del camión, observándose una disminución 429 [ton/día] en el tonelaje transportado, equivalente a un **impacto de (-5,0%)**.

Tabla 16: Impacto generado en el tonelaje transportado por la variación de parámetros operacionales del tercer nivel del Árbol de Valor relacionados a la disponibilidad y al UEBD al realizar una variación sensibilizada.

Parámetro Operacional	Unidad	Valor Plan	Valor +10%	Nuevo Tonelaje Transportado [ton/día]	Δ Tonelaje Transportado [ton/día]	Impacto %
Fuera de Servicio	%	24,1	26,5	8.258	-272	-3,2
Pérdidas Operacionales	%	4,6	5,1	8.508	-49	-0,6
Demoras	%	2,9	3,2	8.526	-31	-0,4
Reservas	%	12,3	13,5	8.426	-131	-1,5

La Tabla 16Tabla 11 presenta el tercer nivel del Árbol de Valor relacionado al desglose de la disponibilidad y el UEBD. Por el lado de la disponibilidad, el único parámetro operacional que genera un impacto en el tonelaje transportado es el fuera de servicio, observándose una disminución de 272 [ton/día] en el tonelaje transportado, equivalente a un **impacto de (-3,2%)**. En cuanto al UEBD, el parámetro operacional que genera un mayor impacto en el tonelaje transportado son las reservas, observándose una disminución de 131 [ton/día] en el tonelaje transportado, equivalente a un **impacto de (-1,5%)**.

La Tabla 14, Tabla 15 y Tabla 16 Figura 41: Estructura final de Árbol de Valor donde se detalla el impacto de cada parámetro operacional en el tonelaje transportado al día por camión. permiten visualizar el impacto generado en el tonelaje transportado al día por camión, al sensibilizar los parámetros operacionales en un 10% en contra. De esto se desprende que el parámetro operacional que genera el **mayor impacto de manera general en el tonelaje transportado es el payload y el tiempo efectivo**, ambos generando un impacto (-10%). Dentro de la ramificación

del tiempo efectivo, se observa un impacto directo de la disponibilidad y el UEBD, ambos generando una disminución del KPI principal de 10%. Respecto al tercer nivel del Árbol de Valor relacionado al tiempo efectivo, el parámetro operacional que genera mayor impacto en el tonelaje transportado es el fuera de servicio, generando una disminución del KPI principal de 3,2%.

En cuanto a la rama del tiempo de ciclo, el parámetro operacional que genera el mayor impacto en el tonelaje transportado es el tiempo de viaje cargado, observándose un impacto del (-4,5%) en el tonelaje transportado. Respecto al tercer nivel del Árbol de Valor relacionado al tiempo de ciclo, el parámetro operacional que genera mayor impacto en el tonelaje transportado es la velocidad cargado del camión, generando una disminución del KPI principal de 5,0%.

4.4 Valorización Económica

Dentro de los objetivos del estudio se encuentra la realización de una valorización económica, la cual buscan identificar el impacto económico que generan los parámetros operacionales en el tonelaje transportado. Esta valorización se realiza siguiendo la misma metodología realizada anteriormente, utilizando información de la planificación e información real de la mina en estudio.

La valorización económica tiene como objetivo cuantificar el costo necesario para mover una tonelada diaria por camión. Para ello se hace uso del costo por hora operativa presupuestado por la mina en estudio, obtenido a partir de los parámetros planificados para la flota de camiones Komatsu 930E-4SE. Este presupuesto es de 409 [US\$/hr op.]

Para lograr esta valorización, se sigue el mismo ejercicio realizado anteriormente, donde en una primera instancia se obtiene el costo por tonelada planificada y real para el mes de enero de 2021, y luego se cuantifica el impacto de cada parámetro operacional en el costo por tonelada, lo que permite entender donde focalizar las mejoras de acuerdo con su relevancia en el proceso.

En base al presupuesto del costo por hora operativa de la mina en estudio y a los resultados del mes de enero de 2021 obtenidos en el Árbol de Valor desarrollado (ver Figura 40), se procede a calcular el costo por tonelada planificado y real, según las siguientes ecuaciones:

$$\text{Costo por Tonelada} \left[\frac{\text{US\$}}{\text{ton}} \right] = \text{Gasto Operativo} \left[\frac{\text{US\$}}{\text{día}} \right] \div (\text{Tonelaje Transportado} \left[\frac{\text{ton}}{\text{día}} \right]) \quad (4.22)$$

$$\text{Gasto Operativo} \left[\frac{\text{US\$}}{\text{día}} \right] = \text{Horas Operativas} \left[\frac{\text{hrs op.}}{\text{día}} \right] \times \text{Costo por Hora Operativa} \left[\frac{\text{US\$}}{\text{hr op.}} \right] \quad (4.23)$$

Como se puede observar en la Figura 23 y en la Figura 34, las horas operativas planificadas y reales para el mes de enero de 2021 son 16,0 [hrs] y 16,3 [hrs] respectivamente. Así, se obtienen los siguientes gastos operativos:

$$\text{Gasto Operativo}_{\text{Plan}} \left[\frac{\text{US\$}}{\text{día}} \right] = 16,0 \left[\frac{\text{hrs op.}}{\text{día}} \right] \times 409 \left[\frac{\text{US\$}}{\text{hr op.}} \right] \approx 6.544 \left[\frac{\text{US\$}}{\text{día}} \right] \quad (4.24)$$

$$\text{Gasto Operativo}_{\text{Real}} \left[\frac{\text{US\$}}{\text{día}} \right] = 16,3 \left[\frac{\text{hrs op.}}{\text{día}} \right] \times 409 \left[\frac{\text{US\$}}{\text{hr op.}} \right] \approx 6.666 \left[\frac{\text{US\$}}{\text{día}} \right] \quad (4.25)$$

A partir de estos resultados y utilizando el tonelaje transportado planificado y real obtenido en el Árbol de Valor (ver Figura 40), se procede a calcular el costo por tonelada para ambos casos:

$$\text{Costo por Tonelada}_{\text{Plan}} \left[\frac{\text{US\$}}{\text{ton}} \right] = 6.544 \left[\frac{\text{US\$}}{\text{día}} \right] \div 8.557 \left[\frac{\text{ton}}{\text{día}} \right] \approx 0,76 \left[\frac{\text{US\$}}{\text{ton}} \right] \quad (4.26)$$

$$\text{Costo por Tonelada}_{Real} \left[\frac{US\$}{ton} \right] = 6.667 \left[\frac{US\$}{día} \right] \div 7.054 \left[\frac{ton}{día} \right] \approx 0,94 \left[\frac{US\$}{ton} \right] \quad (4.27)$$

A partir de estas ecuaciones se desprende que el costo por tonelada real, resultante de los parámetros obtenidos en el mes de enero de 2021, es un 0,18 $[US\$/ton]$ más caro que el costo por tonelada planificado, equivalente a un **23,6% más caro** aproximadamente. Entendiendo este costo más alto como una consecuencia al no aprovechamiento del camión.

Para entender el impacto que tiene cada parámetro del Árbol de Valor en el costo por tonelada se realiza el análisis de impacto según la **Metodología Árbol de Valor**. Esto se realiza de la siguiente manera:

1. Se utiliza como base de comparación los parámetros operacionales planificados del mes de enero de 2021.
2. Se varía solo el valor de uno de los parámetros operacionales planificados por su valor real respectivo, obteniendo un nuevo costo por tonelada. A modo de ejemplo se realiza el ejercicio variando el valor planificado del *payload* de 292 $[ton]$ por su valor real de 284 $[ton]$.

$$\text{Tonelaje Transportado} \left[\frac{ton}{día} \right] = 284 \left[\frac{ton}{vuelta} \right] \div \left(29,9 \left[\frac{min}{vuelta} \right] \times \frac{1}{60} \left[\frac{hrs}{min} \right] \right) \times 14,6 \left[\frac{hrs}{día} \right] \approx 8.323 \left[\frac{ton}{día} \right] \quad (4.28)$$

$$\text{Costo por Tonelada}_{\Delta \text{Payload}} \left[\frac{US\$}{ton} \right] = 6.544 \left[\frac{US\$}{día} \right] \div \left(8.323 \left[\frac{ton}{día} \right] \right) \approx 0,79 \left[\frac{US\$}{ton} \right] \quad (4.29)$$

3. A continuación, se calcula el impacto que genera este parámetro (*payload*) en el KPI principal:

$$\text{Impacto}_{\text{Payload}} [\%] = \frac{\left(\text{Costo por Tonelada}_{\Delta \text{Payload}} \left[\frac{US\$}{ton} \right] - \text{Costo por Tonelada}_{\text{Plan}} \left[\frac{US\$}{ton} \right] \right)}{\text{Costo por Tonelada}_{\text{Plan}} \left[\frac{US\$}{ton} \right]} \times 100 [\%] \quad (4.30)$$

$$\text{Impacto}_{\text{Payload}} [\%] = \frac{\left(0,79 \left[\frac{US\$}{ton} \right] - 0,76 \left[\frac{US\$}{ton} \right] \right)}{0,76 \left[\frac{US\$}{ton} \right]} \times 100 [\%] \approx -2,8 [\%] \quad (4.31)$$

4. Repitiendo este ejercicio para los demás parámetros del primer nivel del Árbol de Valor, se obtiene un impacto para el *payload*, tiempo de ciclo y tiempo efectivo de +2,8%, +15,3% y +2,3% respectivamente.
5. El siguiente paso es **calcular el impacto ajustado** de cada parámetro. A modo de ejemplo, se realiza este ejercicio con el parámetro *payload*:

$$\text{Impacto Ajustado}_{\text{Payload}} [\%] = (+2,8 [\%] \times +23,6 [\%]) \div +20,4 [\%] \approx +3,2 [\%] \quad (4.32)$$

6. Repitiendo este ejercicio para los demás parámetros del primer nivel del Árbol de Valor, se obtiene un impacto ajustado para el *payload*, tiempo de ciclo y tiempo efectivo de +3,2%, +17,6% y +2,6% respectivamente, donde la suma de estos resulta en +23,6%, siendo equivalente al déficit obtenido a partir de la metodología de Árbol de Valor. Cabe destacar que este impacto ajustado se denominara como “impacto”.
7. A continuación, se calcula el **impacto en base cien por ciento**, facilitando aún más la visualización de los resultados. A modo de ejemplo, se realiza este ejercicio con el parámetro *payload*:

$$\text{Impacto Payload}_{\text{Base } 100\%} [\%] = (+2,8 [\%] \times +100 [\%]) \div +23,6 [\%] \approx +13,8 [\%] \quad (4.33)$$

8. Repitiendo este ejercicio para los demás parámetros del primer nivel del Árbol de Valor, se obtiene un impacto en base cien por ciento para el *payload*, tiempo de ciclo y tiempo efectivo de +13,8%, +74,8% y +11,4% respectivamente, donde la suma de estos resulta en un +100%.
9. Este ejercicio se repite en los siguientes niveles del Árbol de Valor, tomando como base el impacto del parámetro del nivel anterior.

Cabe destacar que un porcentaje negativo representa el impacto en el KPI principal que genera el valor real del parámetro operacional al no alcanzar el valor esperado por el plan, mientras que un porcentaje positivo representa el impacto en el KPI principal que genera el valor real al ser mejor al valor esperado por el plan.

Los resultados de esta metodología de cálculo se presentan en las siguientes tablas (separadas según el nivel del árbol de valor), donde se observa de izquierda a derecha el parámetro operacional, valor planificado, valor real, nuevo costo por tonelada (resultante al utilizar el valor real y dejando los demás parámetros según lo planificado), la variación del costo por tonelada (resultante de la resta entre el nuevo costo por tonelada y el costo por tonelada planificado de 0,76 [US\$/ton], representado por $\Delta\text{Costo por Tonelada}$), impacto en porcentaje que genera el parámetro operacional real en el tonelaje transportado, e impacto en base cien por ciento.

I. Primer Nivel Árbol de Valor

Tabla 17: Impacto generado en el costo por tonelada por parámetros operacionales del primer nivel del Árbol de Valor.

Parámetro Operacional	Unidad	Valor Plan	Valor Real	Nuevo Costo por Tonelada [US\$/ton]	$\Delta\text{Costo por Tonelada}$ [US\$/ton]	Impacto %	Impacto Base 100%
Payload	[ton]	292	284	0,79	+0,03	+3,4	+13,8
T. Ciclo	[min]	29,9	34,5	0,88	+0,12	+17,6	+74,8
T. Efectivo	[hr/día]	14,6	14,3	0,79	+0,03	+2,6	+11,4
Total					+0,18	+23,6	+100%

A partir de la Tabla 17, se desprende que el parámetro operacional del primer nivel del Árbol de Valor que genera un mayor impacto en el costo por tonelada es el tiempo de ciclo, observándose un **aumento de 0,12 [US\$/ton]** en el costo por tonelada, equivalente a **impacto de +17,6%** o un **impacto en base cien por ciento de +74,8%**. Seguido por el *payload*, el cual genera un **aumento de 0,03 [US\$/ton]** en el costo por tonelada, equivalente a un **impacto de +3,4%** o un **impacto en base cien por ciento de +13,8%**. Y, finalmente el tiempo efectivo, el cual genera un **aumento de 0,03 [US\$/ton]** en el costo por tonelada, equivalente a **impacto de 2,6%** o un **impacto en base cien por ciento de +11,4%**. Para identificar en mayor detalle el impacto en el KPI principal es necesario observar el siguiente nivel del Árbol de Valor. La suma de los impactos del primer nivel resulta en el impacto total en el costo por tonelada equivalente a +23,6%.

II. Segundo Nivel Árbol de Valor

Tabla 18: Impacto generado en el costo por tonelada por la variación de parámetros operacionales del segundo nivel del Árbol de Valor relacionados al tiempo de ciclo.

<i>Parámetro Operacional</i>	<i>Unidad</i>	<i>Valor Plan</i>	<i>Valor Real</i>	<i>Nuevo Costo por Tonelada [US\$/ton]</i>	<i>Δ Costo por Tonelada [US\$/ton]</i>	<i>Impacto %</i>	<i>Impacto Base 100%</i>
<i>T. Viaje Vacío</i>	<i>[min]</i>	9,7	14,4	0,89	+0,13	+18,1	+76,7
<i>Acul. Carga</i>	<i>[min]</i>	1,0	1,0	0,76	-	-	-
<i>T. Cargando</i>	<i>[min]</i>	3,0	2,1	0,73	-0,03	-3,5	-14,7
<i>T. Viaje Cargado</i>	<i>[min]</i>	14,2	15,2	0,79	+0,03	+3,8	+16,1
<i>Acul. Descarga</i>	<i>[min]</i>	1,0	1,0	0,76	-	-	-
<i>T. Descargando</i>	<i>[min]</i>	1,0	0,8	0,75	-0,01	-0,8	-3,3
Total					+0,12	+17,6	+74,8%

La Tabla 18 presenta el segundo nivel del Árbol de Valor relacionado al desglose del tiempo de ciclo, del cual se desprende que el parámetro operacional que genera un mayor impacto en el costo por tonelada es el tiempo de viaje vacío, observándose un **aumento de 0,12 [US\$/ton]** en el costo por tonelada, equivalente a **impacto de +18,1%** o un **impacto en base cien por ciento de +76,7%**. La suma del impacto del segundo nivel respecto al tiempo de ciclo resulta en el impacto total del tiempo de ciclo, equivalente a +17,6% o un impacto en base cien por ciento de +74,8%.

Tabla 19: Impacto generado en el costo por tonelada por la variación de parámetros operacionales del segundo nivel del Árbol de Valor relacionados al tiempo efectivo.

<i>Parámetro Operacional</i>	<i>Unidad</i>	<i>Valor Plan</i>	<i>Valor Real</i>	<i>Nuevo Costo por Tonelada [US\$/ton]</i>	<i>ΔCosto por Tonelada [US\$/ton]</i>	<i>Impacto %</i>	<i>Impacto Base 100%</i>
<i>Disponibilidad</i>	<i>%</i>	75,9	75,1	0,77	+0,01	+1,2	+5,2
<i>UEBD</i>	<i>%</i>	80,2	79,2	0,78	+0,02	+1,4	+6,2
Total					+0,03	+2,6	+11,4%

La Tabla 19 presenta el segundo nivel del Árbol de Valor relacionado al desglose del tiempo efectivo, del cual se desprende que el parámetro operacional que genera un mayor impacto en el costo por tonelada es el UEBD, observándose un **aumento de 0,01 [US\$/ton]** en el costo por tonelada, equivalente a **impacto de 1,4%** o un **impacto en base cien por ciento de +6,2%**. La suma del impacto del segundo nivel respecto al tiempo efectivo resulta en el impacto total del tiempo efectivo, equivalente a +2,6% o un impacto en base cien por ciento de +11,4%.

Siguiendo con el ejercicio, se procede a observar el impacto generado por los parámetros operacionales del tercer nivel del Árbol de Valor.

III. Tercer Nivel Árbol de Valor

Tabla 20: Impacto generado en el costo por tonelada por la variación de parámetros operacionales del tercer nivel del Árbol de Valor relacionados al tiempo de viaje vacío y cargado.

<i>Parámetro Operacional</i>	<i>Unidad</i>	<i>Valor Plan</i>	<i>Valor Real</i>	<i>Nuevo Costo por Tonelada [US\$/ton]</i>	<i>ΔCosto por Tonelada [US\$/ton]</i>	<i>Impacto %</i>	<i>Impacto Base 100%</i>
<i>Dist. Vacío</i>	<i>[km]</i>	6,2	5,8	0,74	-0,02	-2,2	-9,5

Veloc. Vacío	[km/hr]	38,3	24,2	0,91	+0,15	+20,3	+86,2
Total					+0,13	+18,1	+76,7%
Dist. Cargado	[km]	6,2	5,8	0,74	-0,02	-3,1	-13,2
Veloc. Cargado	[km/hr]	26,2	22,9	0,81	+0,05	+6,9	+29,3
Total					+0,03	+3,8	+16,1%

La Tabla 20 presenta el tercer nivel del Árbol de Valor relacionado al desglose del tiempo de viaje vacío y cargado. Por el lado del tiempo de viaje vacío, el parámetro operacional que genera un mayor impacto en el tonelaje transportado es la velocidad del camión vacío, observándose un **aumento de 0,14 [US\$/ton]** en el costo por tonelada, equivalente a un **impacto de 20,3%** o un **impacto en base cien por ciento de +86,2%**. La suma del impacto del tercer nivel respecto al tiempo de viaje vacío resulta en el impacto total del tiempo de viaje vacío, equivalente a +18,1% o un impacto en base cien por ciento de +76,7%.

En cuanto al tiempo de viaje cargado, el parámetro operacional que genera un mayor impacto en el tonelaje transportado es la velocidad del camión cargado, observándose un **aumento de 0,05 [US\$/ton]** en el costo por tonelada, equivalente a un **impacto de 6,9%** o un **impacto en base cien por ciento de +29,3%**. La suma del impacto del tercer nivel respecto al tiempo de viaje cargado resulta en el impacto total del tiempo de viaje cargado, equivalente a +3,8% o un impacto en base cien por ciento de +16,1%.

Tabla 21: Impacto generado en el costo por tonelada por la variación de parámetros operacionales del tercer nivel del Árbol de Valor relacionados a la disponibilidad y al UEBD.

Parámetro Operacional	Unidad	Valor Plan	Valor Real	Nuevo Costo por Tonelada [US\$/ton]	ΔCosto por Tonelada [US\$/ton]	Impacto %	Impacto Base 100%
Fuera de Servicio	%	24,1	24,9	0,77	+0,01	+1,2	+5,2
Total					+0,01	+1,2	+5,2%
Pérdidas Operacionales	%	4,6	9,8	0,81	+0,05	+5,5	+23,4
Demoras	%	2,9	1,3	0,75	-0,01	-1,6	-6,6
Reservas	%	12,3	9,7	0,74	-0,02	-2,5	-10,6
Total					+0,02	+1,4	+6,2%

La Tabla 21Tabla 11 presenta el tercer nivel del Árbol de Valor relacionado al desglose de la disponibilidad y el UEBD. Por el lado de la disponibilidad, el único parámetro operacional que genera un impacto en el tonelaje transportado es el fuera de servicio, observándose un **aumento de 0,01 [US\$/ton]** en el costo por tonelada, equivalente a un **impacto de 1,2%** o un **impacto en base cien por ciento de +5,2%**.

En cuanto al UEBD, el parámetro operacional que genera un mayor impacto en el tonelaje transportado son las pérdidas operacionales, observándose un **aumento de 0,05 [US\$/ton]** en el costo por tonelada, equivalente a **impacto de 5,5%** o un **impacto en base cien por ciento de**

+23,4%. La suma del impacto del tercer nivel respecto al UEBD resulta en el impacto total del UEBD, equivalente a +1,4% o un impacto en base cien por ciento de +6,2%.

Así, la estructura final del Árbol de Valor relacionada a los costos, donde se detalla el impacto de cada parámetro operacional sobre el costo por tonelada, se presenta a continuación:

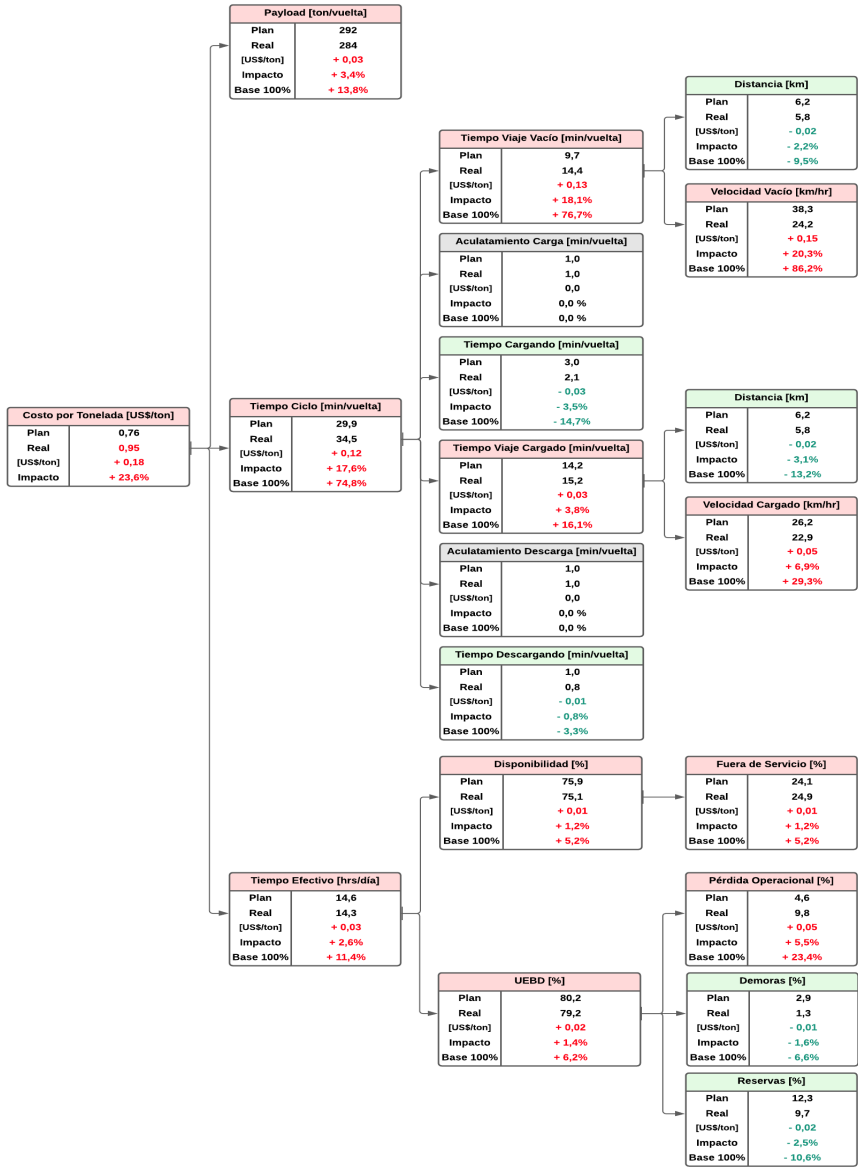


Figura 42: Estructura final de Árbol de Valor relacionado al costo por tonelada, donde se detalla el impacto de cada parámetro operacional en el costo por tonelada.

La Figura 41: Estructura final de Árbol de Valor donde se detalla el impacto de cada parámetro operacional en el tonelaje transportado al día por camión. Figura 42 permite visualizar las brechas operacionales existentes entre parámetros planificados y reales, además de su respectivo impacto en el costo por tonelada, del cual se desprende que el parámetro operacional que genera el mayor impacto en costo por tonelada está relacionado al tiempo de ciclo del camión, que **representa un +74,8% de la brecha total del costo por tonelada**. El tiempo de viaje vacío equivale al +76,7% de la baja en el tiempo de ciclo y el -86,2% del impacto en el tiempo de viaje vacío está representada por la velocidad en vacío.

4.5 Análisis de Resultados

A partir de los resultados presentados en los apartados de **Brechas Operacionales y Valorización Económica** se procede a realizar el análisis pertinente que permita darles un significado a los resultados obtenidos.

En primera instancia se utilizó la metodología de Árbol de Valor para identificar las brechas operacionales que presenta la mina de estudio en el periodo de enero de 2021, donde se identificaron de manera visual y valórica los parámetros operacionales que presentan brechas operacionales frente a los parámetros planificados, ya sean positivos o negativos (ver Figura 40), y que, por lo tanto, causan un aumento o una disminución en la productividad diaria de los camiones (representada por el tonelaje transportado al día por camión). Se observa que la productividad diaria de los camiones difiere con lo planificado en 1.503 [ton], equivalente a un 17,6% de déficit. En líneas generales se observa que gran parte de la brecha en el tonelaje transportado, fue provocada una actividad en específico con más del 80% de influencia en la brecha total (velocidad camión vacío).

El Árbol de Valor identifica de manera rápida y eficaz los parámetros operacionales que afectan en mayor medida a la productividad diaria de los camiones. Además, este análisis es complementado con una valorización económica, donde a partir de la metodología de Árbol de Valor, se busca identificar el impacto económico que generan las brechas operacionales existentes en el costo por tonelada.

Por el lado técnico, se observa en el Árbol de Valor de la Figura 41 que el parámetro operacional que genera un **mayor impacto en la productividad diaria de los camiones es la velocidad del camión vacío**, observándose un impacto de (-15,4%) en el tonelaje transportado o un **impacto en base cien por ciento de (-87,6%)**. Este resultado concuerda con la valorización económica, donde se observa en el Árbol de Valor de la Figura 42 que el parámetro operacional que genera un **mayor impacto en el costo por tonelada es la velocidad del camión vacío**, observándose un aumento de 0,15 [US\$/ton] en el costo por tonelada o un **impacto en base cien por ciento de +86,2%**.

La visualización de los impactos en base cien por ciento tiene como objetivo facilitar e identificar de manera más rápida los problemas que afectan a los KPI's principales, destacando los parámetros operacionales más perjudicantes.

Por lo tanto, a partir de la metodología de Árbol de Valor se logra identificar que la priorización de medidas debe centrarse en la rama del tiempo de ciclo, específicamente en la velocidad vacío de los camiones Komatsu 930E-4SE, ya que es este parámetro el gran perjudicante en la disminución de la productividad diaria de los camiones y en el aumento del costo por tonelada.

Por otro lado, el análisis de sensibilización permite identificar de manera general el impacto en el tonelaje transportado al variar de manera individual los parámetros operacionales en una misma medida. A partir de este análisis se observa en la Tabla 14, Tabla 15 y Tabla 16, que al variar cada parámetro un 10% en contra, el parámetro operacional que genera mayor impacto en el tonelaje transportado es el *payload* y el tiempo efectivo, debido a su relación directa en la productividad de los camiones.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Las faenas mineras de la industria nacional presentan un desempeño decreciente en cuanto a su productividad en los últimos años, incluido el proceso de transporte. La metodología de Árbol de Valor es una herramienta efectiva para ayudar con esta problemática, facilitando la identificación de problemas en el proceso de transporte, y así tomar medidas rápidas que aumenten la productividad del proceso.

La metodología de Árbol de Valor propuesta permite analizar los parámetros que influyen en el desempeño de la flota de camiones, presentando de manera gráfica y esquemática el impacto que generan las brechas detectadas en los parámetros operacionales en la productividad diaria de los camiones, mostrando técnica y económicamente los puntos de mayor y menor impacto en la operación de transporte.

Esta metodología incorpora de manera exitosa el ciclo de transporte de una flota de camiones, interrelacionando las actividades con los indicadores que afectan la productividad y el plan de producción. La metodología analiza los parámetros operacionales más relevantes e influyentes en la productividad de los camiones, desglosando dicha productividad en tres parámetros principales, *payload*, tiempo de ciclo y tiempo efectivo, los cuales a su vez se desglosan en dos niveles de análisis. Según lo analizado en el caso de estudio se observa que los niveles propuestos son suficientes para gestionar de buena forma el desempeño de la flota de transporte. Si bien la estructura del Árbol de Valor propuesto podría desglosarse aún más, la relevancia que tendrían estos nuevos parámetros sobre el KPI principal sería menor, por lo que su incorporación no afectaría en una gran medida en el resultado.

Cabe destacar que la cantidad de parámetros involucrados es importante al momento de utilizar esta metodología. Al tener una menor cantidad de parámetros operacionales medidos, puede provocar que no se identifique de manera rápida y efectiva la brecha de mayor impacto como lo ofrece la metodología. Caso contrario, al tener muchos parámetros o niveles del Árbol de Valor, el manejo de la identificación de brechas puede verse afectado. Por lo tanto, es importante que la operación minera tenga un nivel de detalle suficiente para poder gestionar de manera exitosa la operación, y a su vez utilizar la cantidad de parámetros adecuada de tal forma de no tener un exceso de actividades. En este estudio, se estima que la cantidad de actividades analizadas en tres niveles es suficiente para cumplir con el objetivo del Árbol de Valor.

Así, la herramienta de Árbol de Valor permite identificar de manera rápida y eficaz el impacto que generan los distintos parámetros operacionales en el KPI principal, otorgando un porcentaje de impacto a cada variable, para ayudar en el orden de priorización de reducción de brechas, y así lograr de manera más rápida a la producción planificada de los camiones.

Para el caso de estudio, la priorización de medidas debiese centrarse por el lado del tiempo de ciclo, que representa un (-72,5%) de la brecha total del tonelaje transportado. El tiempo de viaje vacío equivale al (-75,9%) de la baja en el tiempo de ciclo y el (-87,6%) del impacto en el tiempo de viaje vacío está representada por la velocidad en vacío. Lo importante a destacar de este ejemplo, es que el Árbol de Valor ayuda rápidamente a puntualizar actividades que afecten en mayor medida en el KPI principal y en base a eso posteriormente decidir qué acciones tomar.

Lo anterior representa una ventaja del Árbol de Valor respecto a identificar brechas únicamente tomando como valor de referencia el objetivo del parámetro de manera unitaria. Al identificar brechas de manera unitaria, no se logra priorizar de manera correcta, solo se identifica de

manera aislada el no cumplimiento de algunas actividades. Con la metodología de Árbol de Valor, las brechas identificadas se asocian rápidamente al impacto en el KPI principal. Esto ayuda a la operación minera a centrarse en las actividades más relevantes por la brecha que genera y no en todas las actividades que presenten brechas.

Respecto al análisis económico realizado, se logró identificar los parámetros operacionales que impactan en mayor medida en el costo por tonelada, identificando aquellas actividades que generan un aumento o disminución de los costos de transporte.

Además, el análisis del caso de estudio puede ser extendido según los requerimientos de análisis de la mina, pudiendo ampliar el rango de tiempo de análisis. Por ejemplo, realizar una valorización anual permitiría identificar las principales brechas el proceso de transporte y por lo tanto determinar de mejor manera el presupuesto y las variables que afectan en mayor o menor grado su valor. De esta manera, se evidencia que la metodología de Árbol de Valor puede tener otros usos adicionales a partir de la identificación de brechas técnicas y económicas de un proceso.

En línea con lo anterior, la metodología de Árbol de Valor utilizada en este estudio se realizó en específico para una flota de transporte, pero puede ser adaptada a otros procesos tales como perforación, carguío, mantenimiento, etc.

6. REFERENCIAS

1. (s.f.). *Apunte de minería a cielo abierto*. Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería Civil de Minas.
2. Bahamóndez, M. J. (2017). *Implementación sistema de gestión de reducción de costos optimizando el desempeño por componente en equipos mineros*. Memoria de Título, Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería de Minas, Santiago.
3. Bonzi, J. I. (2016). *Propuesta de Mejora de la Utilización Efectiva en Base a Disponibilidad de la Flota de Carguío y Transporte en Minería los Pelambres*. Memoria de Título, Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería de Minas.
4. Callejas, P. (2020). *Identificación de parámetros operacionales críticos en el rendimiento de camiones mediante redes bayesianas*. Memoria de Título, Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería de Minas.
5. Cambitsis, A. (2013). *A framework to simplify the management of throughput and constraints*. The Southern African Institute of Mining and Metallurgy.
6. Caterpillar. (2012). *Catálogo camión minero 797F*.
7. Caterpillar. (2014). *Catálogo 6060/6060 FS Pala Hidráulica*.
8. Codelco. (4 de Mayo de 2016). Obtenido de <http://j.mp/1UzUD8i>
9. Comisión Chilena del Cobre. (2018). *Proyección de la producción de cobre en Chile 2018 - 2029*.
10. Comisión Chilena del Cobre. (2020). *Informe de actualización del consumo energético de la minería del cobre al año 2019*.
11. Comisión Chilena del Cobre. (2021). *Productividad en la gran y mediana minería del cobre*.
12. Comisión Nacional de Productividad. (2017). *Estudio de productividad en la gran minería del cobre*. Santiago.
13. Comisión Nacional de Productividad. (2017). *Productividad en la Gran Minería del Cobre*. Santiago: Universitaria S.A.
14. Consejo Minero. (2022). *Cifras actualizadas de la minería*.
15. Corporación de Desarrollo Tencológico. (25 de Agosto de 2015). *Corporación de Desarrollo Tencológico*. Obtenido de <https://www.cdt.cl/construccion-de-caminos-mineros-disenando-la-ruta/>
16. Demodaran, A. (2007). *Probabilistic approaches: scenario analysis, decision trees and simulations*. Working Paper, Stern School of Business, New York.
17. Dupouy, C. (2014). *Aplicación de árboles de decisión para la estimación del escenario económico y la estimación de movimiento la tasa de interés en Chile*. Tesis de grado, Universidad de Chile, Departamento de Economía y Negocios, Santiago.
18. Editec S.A. (2020). *Catastro de Equipamiento Minero 2019-2020*. Santiago.
19. Encare. (2018). *[Benchmark referencial Costos Mina]*.

20. Galiano, F. B. (2002). *Un Método Alternativo para la Construcción de Árboles de Decisión*. Tesis Doctoral, Universidad de Granada, E.T.S Ingeniería Informática, Departamento Ciencias de la Computación e Inteligencia Artificial.
21. Global Mining Guidelines Group. (2020). *A standardized time classification framework for mobile equipment in surface mining: Operational Definitions, Time Usage Model, and Key Performance Indicators*. Global Mining Guidelines Group.
22. González, H. (2017). *Selección y asignación óptima de equipos de carguío para el cumplimiento de un plan de producción en minería a cielo abierto*. Memoria de Título, Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería de Minas, Santiago.
23. Henríquez, D. (2019). *Evaluación del límite óptimo entre minería cielo abierto y sublevel stoping*. Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería en Minas, Santiago.
24. Hilgefort, I. (21 de Abril de 2020). *Linkedin*. Obtenido de <https://www.linkedin.com/pulse/using-sap-analytics-cloud-value-driver-tree-visual-part-hilgefort/>
25. Joy Global. (2016). *Catálogo 4100 XPC Electric Mining Shovel - AC Drive Product Overview*.
26. Komatsu. (2012). *Catálogo Komatsu 930E-4SE*.
27. Komatsu. (2016). *Catálogo PC8000 Mining Shovel*.
28. Komatsu. (2017). *Catálogo camión eléctrico 980E-5*.
29. L.E.K Consulting. (2017). *Identifying and Managing Key Value Drivers*. L.E.K Consulting.
30. Liebherr Mining Equipment Co. (2007). *Catálogo Mining Truck T 282B*.
31. Magri, J. (2014). *Efectos de la incorporación de tecnologías autónomas en el diseño y la planificación minera*. Memoria de Título, Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería de Minas, Santiago.
32. Minería Chilena. (10 de Junio de 2014). *Minería Chilena*. Obtenido de <https://www.mch.cl/informes-tecnicos/neumaticos-mineros-hacia-mejores-rendimientos/>
33. *Optimización del rajo: qué es y cómo se hace*. (3 de Abril de 2012). Obtenido de <https://www.mch.cl/reportajes/optimizacion-del-rajo-que-es-y-como-se-hace/#>
34. Pacheco, J. (2018). *Control de pérdidas operacionales por cambio de turno en compañía minería Sierra Gorda SCM*. Memoria, Universidad de Atacama, Facultad Tecnológica.
35. R. Amstrong, J., & Menon, R. (2012). *Enciclopedia de Salud y Seguridad en el Trabajo*. Madrid: Chantal Dufresne, BA.
36. Rojas, M. (2009). *Descripción Cuantitativa de los Procesos de Extracción y Reducción de Mineral en la Minería de Cobre a Cielo Abierto*. Memoria de Título, Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería Industrial.
37. Salomón, L., Ortiz, A., & Cordero, V. (2018). *Productividad del proceso minero, más allá de la producción*. UNEXPO - UNEG.
38. Socorrás, J. N. (2014). *Árbol de Decisión para la Gestión y Control del Costo de Transporte Interior Mina*. Memoria de Título de Ingeniero Civil Industrial e Ingeniero Civil en Minas,

Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería Industrial, Departamento de Ingeniería en Minas.

ANEXOS

A.1 ANEXO: INFORMACIÓN RELACIONADA A TIEMPOS DE CICLO Y PAYLOAD DEL CAMIÓN

En la Tabla 22 se observan los siguientes datos:

- **Fecha:** corresponde al día, mes y año en que ocurre el ciclo del camión.
- **Turno:** corresponde al turno en el cual se realiza el ciclo del camión (turno A o turno B).
- **Camión:** corresponde al código del camión que realiza el ciclo.
- **Flota_caex:** corresponde al modelo del camión que realiza el ciclo.
- **Pala:** corresponde al código de la pala que es utilizada en el ciclo.
- **Flota_pala:** corresponde al modelo de pala que es utilizada en el ciclo.
- **Polígono:** corresponde al frente de carguío. De aquí se desprende la fase de origen.
- **Material:** corresponde al material transportado.
- **Destino:** corresponde al lugar de destino del camión.

Tabla 22: Extracto de información relacionada a tiempos de ciclo y payload del camión proveniente del sistema de administración de flotas, donde se observa de izquierda a derecha datos de fecha, turno código camión y modelo, código pala y modelo, origen, material movido y destino.

Fecha	Turno	Camión	Flota_caex	Pala	Flota_pala	Polígono	Material	Destino
1/1/2021	A	C940	Kom.930E-4	PA202	PH4100XPA	STO-OML-01/15000	Óxidos Media Ley	CHANCADOR
1/1/2021	A	C830	Kom.930ER	PA202	PH4100XPA	STO-OML-01/15000	Óxidos Media Ley	CHANCADOR
1/1/2021	A	C907	Kom.930E-4SE	PA202	PH4100XPA	STO-OML-01/15000	Óxidos Media Ley	CHANCADOR
1/1/2021	A	C907	Kom.930E-4SE	PA202	PH4100XPA	STO-OML-01/15000	Óxidos Media Ley	CHANCADOR
1/1/2021	A	C830	Kom.930ER	PA202	PH4100XPA	STO-OML-01/15000	Óxidos Media Ley	CHANCADOR
1/1/2021	A	C936	Kom.930E-4	PA202	PH4100XPA	STO-OML-01/15000	Óxidos Media Ley	CHANCADOR
1/1/2021	A	C936	Kom.930E-4	PA202	PH4100XPA	STO-OML-01/15000	Óxidos Media Ley	CHANCADOR
1/1/2021	A	C844	Lieb-T282B	PA206	PH4100XPB	2870F25-OML-17/311220	OBL	CHANCADOR
1/1/2021	A	C844	Lieb-T282B	PA206	PH4100XPB	2870F25-OML-11/311220	OBL	CHANCADOR
1/1/2021	A	C874	Lieb-T282B	PA206	PH4100XPB	2870F25-OML-17/311220	OBL	CHANCADOR

En la Tabla 23 se observan los siguientes datos:

- **Nombre_op_caex:** nombre del operador del camión.
- **Apellido_op_caex:** apellidos del operador del camión.
- **Nombre_op_pala:** nombre del operador de la pala.
- **Apellido_op_pala:** apellidos del operador de la pala.
- **Load_count:** corresponde a la contabilización de carga exitosa, puede tomar los valores “0” si no se cargó en ese ciclo y “1” si es que se realiza la carga.
- **Cycle_count:** corresponde a la contabilización del ciclo realizado, puede tomar los valores “0” si no se realiza ciclo y “1” si es que se realiza el ciclo.
- **Material_tonnage:** corresponde al tonelaje teórico que debiese cargar el camión.
- **Payload:** Corresponde al tonelaje transportado por el camión en el ciclo.

Tabla 23: Extracto de información relacionada a tiempos de ciclo y payload del camión proveniente del sistema de administración de flotas, donde se observa de izquierda a derecha datos de nombre y apellido de operador de camión y pala, contabilización de carga exitosa, contabilización del ciclo realizado, tonelaje teórico que debiese cargar el camión y el tonelaje teórico que debiese cargar el camión.

Nombre_op_caex	Apellido_op_caex	Nombre_op_pala	Apellido_op_pala	load_count	cycle_count	material_tonnage	payload	payload_count
FELIPE	TURINA ARREDONDO	JUAN	OSSANDON ROMERO	1	1	258	290	1
MARO	CASTILLO COVARRUBIAS	JUAN	OSSANDON ROMERO	1	1	258	283	1
MARO	CASTILLO COVARRUBIAS	JUAN	OSSANDON ROMERO	1	1	258	301	1
MARO	CASTILLO COVARRUBIAS	JUAN	OSSANDON ROMERO	1	1	258	322	1
MATIAS	PIZARRO SOTO	JUAN	OSSANDON ROMERO	1	1	258	0	0
FELIPE	TURINA ARREDONDO	JUAN	OSSANDON ROMERO	1	1	258	299	1
FELIPE	TURINA ARREDONDO	JUAN	OSSANDON ROMERO	1	1	258	232	1
CARLOS	ARAYA CASTELLON	RODOLFO	CAMPILLAY CRUZ	1	1	360	0	0
CARLOS	ARAYA CASTELLON	RODOLFO	CAMPILLAY CRUZ	1	1	360	0	0
JORGE	PASTRANA SANTANDER	RODOLFO	CAMPILLAY CRUZ	1	1	360	0	0

En la Tabla 24 se observan los siguientes datos:

- **Distancia_vacio:** corresponde a la distancia que recorre el camión vacío.
- **Distancia_cargado:** corresponde a la distancia que recorre el camión cargado.
- **T_viaje_vacio:** corresponde al tiempo transcurrido mientras el camión viaja vacío.
- **TCola_carga:** corresponde al tiempo en que el camión espera para ser cargado.
- **T_aculat_carga:** corresponde al tiempo que tarda el camión en aculatarse para ser cargado.
- **T_cargando:** corresponde al tiempo que transcurre mientras es cargado el camión.
- **T_viaje_cargado:** corresponde al tiempo transcurrido mientras el camión viaja cargado.
- **TCola_descarga:** corresponde al tiempo en que el camión espera para poder descargar.
- **T_aculat_descarga:** corresponde al tiempo que tarda el camión en aculatarse para descargar.
- **T_descarga:** corresponde al tiempo que demora el camión en descargar material.

Tabla 24: Extracto de información relacionada a tiempos de ciclo y payload del camión proveniente del sistema de administración de flotas, donde se observa de izquierda a derecha datos de distancia recorrida vacío y cargado, tiempo de viaje vacío, tiempo de cola en carga, tiempo de aculatamiento en carga, tiempo de viaje cargado, tiempo de cola en descarga, tiempo de aculatamiento en descarga y tiempo de descarga.

distancia_vacio	distancia_cargado	t_viaje_vacio	tCola_carga	T_aculat_carga	T_cargando	T_viaje_cargado	TCola_descarga	T_aculat_descarga	T_descarga
1966	2198	230	153	26	153	377	19	33	49
7869	2198	650	171	0	114	374	21	187	54
2299	2198	298	5	46	141	498	346	119	53
2299	2011	329	272	28	125	427	448	0	51
4959	2198	1624	0	0	155	373	255	52	52
917	2198	5922	0	0	100	328	152	64	52
2299	2198	277	0	0	174	340	4	143	50
4694	8094	775	159	0	9	1012	346	153	120
5945	7975	569	262	192	93	993	195	174	53
5945	7975	477	5	29	99	1053	138	225	3

A.2 ANEXO: INFORMACIÓN RELACIONADA A ESTADOS DEL CAMIÓN

En la Tabla 26 se observan los siguientes datos:

- **Año:** corresponde al año en que ocurre el turno.
- **Mes:** corresponde al mes en que ocurre el turno.
- **Día:** corresponde al día en que ocurre el turno.
- **Fecha:** corresponde al día, mes y año en que ocurre el turno.
- **Turno:** corresponde al turno en el cual se realiza el evento (turno A o turno B).
- **Tipo equipo:** corresponde al tipo de equipo que está involucrado en el turno. En este caso, el único equipo involucrado son los camiones de extracción (CAEX).
- **Grupo Flota:** corresponde a la marca del camión involucrado en el turno.
- **Flota:** corresponde al modelo del camión involucrado en el turno.
- **Equipo:** corresponde al código del camión que realiza el turno.

Tabla 25: Extracto de información relacionada a estados del camión proveniente del sistema de administración de flotas, donde se observa de izquierda a derecha datos de año, mes, día, fecha, turno, tipo de equipo, grupo de flota, flota y código de equipo.

Año	Mes	Día	Fecha	Turno	Tipo equipo	Grupo Flota	Flota	Equipo
2021	1	1	1/1/2021	A	CAEX	CAT 777-G	CAT 777-G	C-60
2021	1	1	1/1/2021	A	CAEX	CAT 777-G	CAT 777-G	C-80
2021	1	1	1/1/2021	A	CAEX	CAT 777-G	CAT 777-G	C-81
2021	1	1	1/1/2021	A	CAEX	CAT 777-G	CAT 777-G	C-87
2021	1	1	1/1/2021	A	CAEX	ICV	CAT 789-D	C-01
2021	1	1	1/1/2021	A	CAEX	ICV	CAT 789-D	C-02
2021	1	1	1/1/2021	A	CAEX	ICV	CAT 789-D	C-03
2021	1	1	1/1/2021	A	CAEX	ICV	CAT 789-D	C-04
2021	1	1	1/1/2021	A	CAEX	ICV	CAT 789-D	C-05
2021	1	1	1/1/2021	A	CAEX	ICV	CAT 789-D	C-06

En la Tabla 26 se observan los siguientes datos:

- **Hrs Efectivas:** corresponde a las horas efectivas realizadas por el camión en el turno registrado.
- **Hrs PO:** corresponde a las horas de pérdidas operacionales del camión en el turno registrado.
- **Hrs Demoras:** corresponde a las horas de demoras del camión en el turno registrado.
- **Hrs Reservas No Prog:** corresponde a las horas de reservas no programadas del camión en el turno registrado.
- **Hrs Reservas:** corresponde a las horas de reservas programadas del camión en el turno registrado.
- **Hrs Mecánicas FS:** corresponde a las horas en que el camión se encuentra fuera de servicio en el turno registrado.
- **Hrs Operativas:** corresponde a las horas en que el camión se encuentra operativo en el turno registrado.
- **Hrs Disponibles:** corresponde a las horas en que el camión se encuentra disponible en el turno registrado.
- **Hrs Nominales:** corresponde al total de horas que tiene el turno registrado.

Tabla 26: Extracto de información relacionada a estados del camión proveniente del sistema de administración de flotas, donde se observa de izquierda a derecha datos de horas efectivas, pérdidas operacionales, demoras, reservas no programadas, reservas programadas, fuera de servicio, horas operativas, horas disponibles y horas nominales del turno.

Hrs Efectivas	Hrs PO	Hrs Demoras	Hrs Reservas No Prg	Hrs Reserva	Hrs Mecanicas FS	Hrs Operativas	Hrs Disponibles	Hrs Nominales
0,0	0,0	0,0	12,0	0,0	0,0	0,0	12,0	12,0
7,4	0,0	0,0	2,1	0,0	2,5	7,4	9,5	12,0
8,4	0,0	0,0	2,1	0,0	1,5	8,4	10,5	12,0
9,0	0,0	0,0	2,2	0,0	0,9	9,0	11,1	12,0
6,0	0,0	0,0	0,2	0,0	5,8	6,0	6,2	12,0
9,1	0,0	0,0	2,1	0,0	0,9	9,1	11,1	12,0
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	12,0	0,0	0,0	12,0
9,7	0,0	0,0	1,4	0,0	0,8	9,7	11,2	12,0
0,0	0,0	0,0	12,0	0,0	0,0	0,0	12,0	12,0
8,6	0,0	0,0	0,7	0,0	2,7	8,6	9,3	12,0

En la Tabla 27 se observan los siguientes datos:

- **Tonelada Camión:** corresponde al total de toneladas movidas por el camión en el turno registrado.
- **Total Vueltas Camión:** corresponde al total de vueltas realizadas por el camión en el turno registrado.
- **Distancia Subida:** corresponde a la distancia recorrida subiendo por el camión en el turno registrado.
- **Distancia Bajada:** corresponde a la distancia recorrida bajando por el camión en el turno registrado.
- **Distancia Horizontal:** corresponde a la distancia recorrida horizontal por el camión en el turno registrado.
- **Distancia Total:** corresponde al total de la distancia recorrida por el camión en el turno registrado.

Tabla 27: Extracto de información relacionada a estados del camión proveniente del sistema de administración de flotas, donde se observa de izquierda a derecha datos de toneladas transportadas por camión en el turno, total de vueltas realizadas por camión, distancia de subida, distancia de bajada, distancia horizontal y distancia total recorrida

Tonelada Camión	Total Vueltas Camión	Distancia Subida	Distancia Bajada	Distancia Horizontal	Distancia Total
1760	22	0	0	0	0
1920	24	0	0	0	0
1600	20	0	0	0	0
2320	29	0	0	0	0
2240	28	0	0	0	0
3960	22	0	0	0	0
2880	16	0	0	0	0
414	23	0	0	0	0
4320	24	0	0	0	0
3960	22	0	0	0	0

A.3 ANEXO: NORMA ASARCO CASO DE ESTUDIO

Si bien GMG propone una estandarización de la Norma ASARCO, esta no es utilizada al pie de la letra en todas las empresas mineras.

El presente trabajo toma como base de estudio una mina a cielo abierto real de la industria nacional, de la cual se recibió información relacionada a la Norma ASARCO que utilizan en dicha mina. Dicha información se presenta a continuación:

Tiempo Nominal			
Tiempo Disponible			Fuera de Servicio
Tiempo Operativo		Reservas	
Tiempo Efectivo	Pérdidas Op.	Demoras	

Figura 43: Modelo de uso de tiempo utilizados por mina en estudio.

Las categorías de tiempo definidas en la Figura 43 reflejan las clasificaciones que utiliza la mina en estudio, las cuales se detallan a continuación:

- **Tiempo Nominal:** tiempo total disponible, equivalente 365 días al año, 24 horas al día. Este tiempo se asemeja al “**Tiempo Calendario**” propuesto por GMG.
- **Tiempo Disponible:** tiempo que el equipo es necesario y está en condiciones de realizar su función prevista. Este tiempo se asemeja al “**Tiempo Disponible**” propuesto por GMG.
- **Tiempo Fuera de Servicio:** tiempo que el equipo es necesario, pero no está en condiciones de realizar su función prevista. Este tiempo se asemeja al “**Tiempo Fuera de Servicio**” propuesto por GMG.
- **Tiempo Operativo:** tiempo que el equipo está disponible y bajo el control de un humano o sistema. Esta categoría es comúnmente referida como “**Horas Brutas de Funcionamiento**”. Este tiempo se asemeja al “**Tiempo Operativo**” propuesto por GMG.
- **Reservas:** tiempo en que el equipo está disponible pero no operando. Se divide en dos categorías:
 - **Reservas Programadas:** ineficiencias propias del proceso productivo de las cuales se conoce, o se encuentra establecida, su duración máxima de tal forma que su adecuado control permitan alcanzar las metas de producción y costos.
 - **Reservas no Programadas:** el equipo se encuentra disponible para ser utilizado en la operación, pero no se requiere de él por planificación o por algún otro motivo, como falta de operador, falta de capacidad de un equipo complementario o instalaciones y/o fuerza mayor.
- **Tiempo Efectivo:** el equipo se encuentra desarrollando las actividades específicas de diseño para los cuales ha sido adquirido por la organización. Este tiempo se asemeja al “**Tiempo Productivo**” propuesto por GMG.
- **Pérdidas Operacionales:** espacio de tiempo en que el equipo no puede cumplir con su función operacional productiva debido a ineficiencias presentes e inherentes a los ciclos operativos.
- **Demoras:** ineficiencias del proceso productivo de las cuales no se conoce o se tiene certeza de su ocurrencia tanto en el espacio de tiempo como su duración. Este tiempo se asemeja al “**Retraso de operación**” propuesto por GMG.

Las actividades que se clasifican dentro de este modelo son denominan como “elementos temporales básicos”, que son los sucesos utilizados para describir y registrar la actividad operativa. La Figura 44 presenta cómo se clasifican los elementos temporales básicos para la flota de camiones de la mina en estudio.

Tiempo Efectivo	Pérdidas Operacionales	Demoras
• Viaje vacío • Acuatamiento carga • Carga • Viaje cargado • Acuatamiento descarga • Descarga	• Cola en carga • Cola en descarga	• Baño • Obstrucción vía • Llamada telefónica autorizada • Cambio de sitio • Limpieza de frente
Reservas Programadas	Reservas no Programadas	Fuera de Servicio
• Cambio de turno • Colación • Abastecimiento combustible • Tronadura	• Sin operador • Botadero no disponible • Chancador no disponible • Falta de equipo de carguío • Stock lleno • Reunión • Fuerza mayor	• Mantenimiento preventive • Reparación programada • Reparación imprevista • Traslado equipo a mantenimiento • Evento operacional programado

Figura 44: Elementos temporales básicos para camiones utilizados por mina en estudio.

Además de los KPI's mencionados en el apartado de **Parámetros Operacionales**, la mina en estudio utiliza los siguientes KPI's:

- a. **Horas Efectivas:** corresponde al tiempo en que equipo cumple su función y realiza actividades que contribuyen directamente a la producción.

$$\text{Horas Efectivas} = 24 \times \text{Disponibilidad Física} \times \text{UEBD} \quad (\text{A.3.1})$$

- b. **Utilización Efectiva en Base Disponible:** corresponde a la fracción porcentual del tiempo disponible en donde el equipo se encuentra en producción pura y sin pérdidas operacionales.

$$\text{UEBD} = \frac{\text{Tiempo Efectivo}}{\text{Tiempo Disponible}} \quad (\text{A.3.2})$$

- c. **Disponibilidad Física:** porcentaje de tiempo que el equipo está disponible para realizar su función prevista durante un período definido requerido por la operación.

$$\text{Disponibilidad Física} = \frac{\text{Tiempo Nominal} - \text{Fuera de Servicio}}{\text{Tiempo Nominal}} \quad (\text{A.3.3})$$

- d. **Pérdidas Operacionales:** porcentaje de tiempo disponible en que el equipo genera pérdidas operacionales.

$$P.O. = \frac{\text{Tiempo P.O.}}{\text{Tiempo Disponible}} \quad (A.3.4)$$

- e. **Demoras:** porcentaje del tiempo disponible en que el equipo se encuentra en el estatus de demoras.

$$\text{Demoras} = \frac{\text{Tiempo Demoras}}{\text{Tiempo Disponible}} \quad (A.3.5)$$

- f. **Reservas:** porcentaje del tiempo disponible en que el equipo se encuentra en el estatus de reserva.

$$\text{Reservas} = \frac{\text{Tiempo Reservas}}{\text{Tiempo Disponible}} \quad (A.3.6)$$