

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA EN METALURGIA Y DE MATERIALES
SANTIAGO - CHILE



VALORIZACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE TECNOLOGÍA TROLLEY ASSIST PARA UNA MINERA DE RAJO ABIERTO

Presentado por:

MAURICIO ALEJANDRO BRIONES MOYANO

Memoria de Titulación para optar al título de:

INGENIERO CIVIL EN MINAS

Profesor guía:

TATIANE MARIN

Agradecimientos

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento, en primer lugar, a mis padres. Sin su constante apoyo a lo largo de toda mi carrera, sinceramente no creo que habría logrado este importante objetivo. Gracias por quererme, tolerarme y acompañarme en este camino. Ustedes han sido los principales testigos de mis esfuerzos, sacrificios y aprendizajes desde el inicio de esta etapa. Los amo profundamente y siempre estaré orgulloso de ustedes.

A mis amigos, tanto dentro como fuera de la universidad, les debo mucho. A Jerman Zepeda, gracias por ofrecerme diferentes perspectivas de la vida y compartir momentos inolvidables conmigo. A Paz Gajardo, por siempre corregir mis informes y brindarme su apoyo incondicional. A Danitza Digmann, por ofrecerme un lugar donde quedarme cuando los viajes a casa eran largos y las jornadas de estudio interminables. A Diego Arias, por su capacidad de sacarme una sonrisa incluso en los días más difíciles.

A la selección de voleibol de la universidad, gracias por permitirme compartir este hermoso deporte que tanto significado tiene en nuestras vidas. Por los lazos que construimos como equipo y por cada entrenamiento o partido en los que olvidábamos todo para concentrarnos en remachar el balón juntos. Un agradecimiento especial a Luis Bugueño, quien no solo fomentó el desarrollo deportivo, sino que también incentivó a sus deportistas a ser mejores personas, promoviendo valores y respeto, tanto en el deporte como en nuestras carreras profesionales.

A la empresa Tellus Mining, mi gratitud por brindarme las herramientas y el conocimiento necesario para completar este estudio, así como por apoyarme en dar mi primer paso hacia una carrera profesional exitosa.

Finalmente, a mi guía Tatiane Marin, gracias por dedicar su tiempo a resolver mis dudas y proponer estrategias innovadoras que fueron esenciales para el desarrollo de este estudio. Su orientación fue fundamental para alcanzar esta meta.

A todos ustedes, mi más sincero agradecimiento. Este logro también es suyo.

Resumen

Bajo el contexto del cambio climático y la urgencia de mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), la industria minera enfrenta el reto de reducir su huella ambiental. En la operación minera, el transporte representa uno de los mayores contribuyentes de estas emisiones, descarbonizar este segmento se presenta como una estrategia fundamental. La tecnología *Trolley Assist* (TA) emerge como una solución innovadora permitiendo reducir el consumo de combustible en los tramos más exigentes de la mina al suministrar energía eléctrica a los motores de tracción por medio de un sistema de catenarias.

El estudio se enfoca en una mina de rajo abierto en Chile, donde en temas de desempeño, la flota con tecnología TA logra ahorros de combustible cercano al 97% aproximadamente mientras está conectado a la línea eléctrica, en comparación con los camiones convencionales. Además, el aumento de velocidad de transporte incrementa en un 80,3% en ciertos tramos, el cual siempre depende de los largos y la inclinación de rampas.

La evaluación preliminar identificó cuatro rampas en el sector de botadero, de las cuales solo fueron seleccionadas dos (BOT_NE y BOT_SN) con un potencial económico mayor por sobre las otras. Este potencial deriva del ahorro de combustible, compensado por el costo del consumo eléctrico y respaldado por créditos de reducción de emisiones de CO₂. No obstante, la implementación implica inversiones significativas en infraestructura, incluyendo la instalación de una subestación eléctrica y pantógrafos en los camiones, con un CAPEX estimado de 22,2 (MUSD).

Como estrategia de operación, se propone la instalación progresiva de pantógrafos desde el año 2030 en adelante, contemplando un vector máximo de 9 CAEX equipados en los periodos que se moviliza mayor tonelaje. Dicho valor se estima ofreciendo una utilización de los equipos por las rampas candidatas superior al 90%. Para este escenario el análisis económico refleja un VAN de 0,67 (MUSD) con un payback de 18 años utilizando una tasa de descuento del 7%.

En cuanto a la misión de descarbonizar, el máximo potencial de descarbonización que se pudo evaluar fue de un 3,4% al implementar la combinación de rampas BOT_NE y BOT_SN, acompañado con una adaptación máxima de 9 camiones mineros a lo largo de toda la vida de la mina. Estos resultados sugieren que la implementación de *Trolley Assist*, aunque es efectiva en términos de ahorro de combustible y de productividad, es insuficiente para alcanzar las metas de neutralidad de carbono. Se recomienda implementar una combinación de rampa en el sector inpit para poder buscar un mayor beneficio en ahorro de emisiones o combinar el *Trolley Assist* con alguna tecnología asociada a baterías recargables.

Abstract

In the context of climate change and the urgency to mitigate greenhouse gas (GHG) emissions, the mining industry faces the challenge of reducing its environmental footprint. Within mining operations, transportation is one of the largest contributors to these emissions, making the decarbonization of this segment a key strategy. Trolley Assist (TA) technology emerges as an innovative solution, reducing fuel consumption on the most demanding sections of the mine by supplying electrical power to the traction motors via an overhead catenary system.

The study focuses on an open-pit mine in Chile. In terms of performance, the fleet equipped with TA technology achieves fuel savings of approximately 97% when connected to the electrical line, compared to conventional trucks. Additionally, transport speed increases by 80.3% on certain sections, depending on ramp lengths and inclinations.

A preliminary evaluation identified four candidate ramps in the waste dump area, of which only two (BOT_NE and BOT_SN) were selected for their superior economic potential. This potential stems from fuel savings, offset by the cost of electrical consumption and supported by CO₂ emission reduction credits. However, implementation requires significant infrastructure investments, including the installation of an electrical substation and pantographs on the trucks, with an estimated CAPEX of 22.2 MUSD.

A phased installation of pantographs is proposed, starting in 2030, with a maximum of 9 TA-equipped trucks during periods of peak tonnage transport. This approach ensures an equipment utilization rate exceeding 90% on the selected ramps. Under these conditions, the economic analysis shows a Net Present Value (NPV) of 0.67 MUSD and a payback period of 18 years, using a discount rate of 7%.

The maximum decarbonization potential evaluated was 3.4% by implementing the BOT_NE and BOT_SN ramp combination, accompanied by the adaptation of up to 9 mining trucks over the mine's lifetime. These results suggest that while the implementation of Trolley Assist is effective in terms of fuel savings and productivity, it falls short of achieving carbon neutrality goals. It is recommended to integrate an in-pit ramp combination to achieve greater emission savings or to combine Trolley Assist with battery-powered technologies.

Tabla de contenido

1	Introducción	11
2	Objetivos y alcance	13
2.1	Objetivo Principal	13
2.2	Objetivos Específicos	13
2.3	Alcance	13
3	Antecedentes	14
3.1	Proceso de transporte en la gran minería	15
3.2	<i>Trolley Assist</i> (TA)	16
3.3	Operación con <i>Trolley Assist</i>	19
3.4	Norma Asarco	24
3.5	Cálculo de flota de transporte	26
3.6	Herramientas de simulación para tiempo de ciclo de transporte	28
4	Metodología	31
4.1	Metodología desarrollo técnico	33
4.2	Metodología valorización económica	37
5	Caso de estudio	39
6	Resultados	44
6.1	Desarrollo técnico	44
6.1.1	Resultados de simulación	44
6.1.2	Análisis por pasada	46
6.1.3	Cálculo de tiempo de ciclo caso base	54
6.1.4	Cálculo de tiempo de ciclo con TA	56
6.1.5	Productividad de flota caso base	57
6.1.6	Productividad de flota TA	59
6.1.7	Dimensionamiento de flota caso base	60
6.1.1	Selección cantidad número de pantógrafos	62
6.1.2	Dimensionamiento de flota con TA	64
6.1.3	Ahorro de combustible	65
6.2	Valorización económica	66
7	Discusión de resultados	70
8	Conclusiones y recomendaciones	75

9	Referencias	77
---	-------------------	----

Índice de figuras

Figura 1: Emisiones directas e indirectas por proceso en la minería del cobre en Chile (COCHILCO, 2022).	11
Figura 2. Equipo de transporte de alto tonelaje (mineriaenlinea.com)	16
Figura 3: CAEX conectado a línea Trolley Assist en Suecia (miningmagazine.com).	17
Figura 4: Curvas rimpull de equipo KOM930 (Tellus-mining).	18
Figura 5: Operación de los camiones de extracción con y sin Trolley Assist ((Mazumdar, Performance Improvement of Mining Haul Trucks , 2011)).	19
Figura 6: Infraestructura eléctrica TA (Tellus-mining).	20
Figura 7: Infraestructura eléctrica y camión TA (Tellus-mining).	21
Figura 8: Dimensión preliminar (Komatsu Holding South America Ltda.).	22
Figura 9: Diseño de camino, caso ideal (Tellus Mining).	23
Figura 10: Representación gráfica simulador Haul Infinity (Alastri Software, 2024).	29
Figura 11: Perfil de velocidad y elevación de un origen y destino.	30
Figura 12: Metodología.	31
Figura 13: Metodología de desarrollo técnico.	33
Figura 14: Plan de producción mina.	39
Figura 15: Topografía de mina 2030.	40
Figura 16: Disponibilidad física y utilización efectiva.	40
Figura 17: Grafico de consumo de combustible.	41
Figura 18: Grafico de consumo de electricidad TA.	41
Figura 19: Rutas dibujadas sobre topografías.	45
Figura 20: Simulación origen destino caso de estudio.	45
Figura 21: Movimiento de material a botaderos.	46
Figura 22: Rampas candidatas expit.	48
Figura 23: Rampas ubicadas en botadero norte.	48
Figura 24: Rampas ubicadas en botadero sur.	49
Figura 25: Velocidades de tramos con y sin TA.	51
Figura 26: Ahorro de combustible y consumo de electricidad de cada tramo.	52
Figura 27: Ahorro de emisiones en cada tramo.	52
Figura 28: Resultado de tiempos de viaje por año flota tradicional.	55
Figura 29: Resultado de tiempos de ciclo anual para flota tradicional.	55
Figura 30: Resultado de tiempos de viaje anual con flota TA.	56
Figura 31: Resultado de tiempos de ciclo anual con flota TA.	56
Figura 32: Horas efectivas anuales de equipos de transporte por plan.	57
Figura 33: Rendimiento de flota tradicional.	58
Figura 34: Productividad anual de CAEX tradicional	58
Figura 35: Rendimiento anual de CAEX TA.....	59
Figura 36: Productividad anual de CAEX TA.....	60
Figura 37: Calculo de CAEX caso base.	60
Figura 38: Disponibilidad física y utilización efectiva ajustada.....	61
Figura 39: CAEX sin TA ajustado.	61

Figura 40: Requerimiento máximo de equipos TA.....	62
Figura 41: Utilización de equipos TA con respecto al tonelaje a mover.....	63
Figura 42: Caso optimo de utilización de pantógrafos.....	63
Figura 43: Calculo CAEX con TA.....	64
Figura 44: Disponibilidad física y utilización efectiva ajustada.....	64
Figura 45: CAEX con TA ajustado.....	65
Figura 46: Consumo de combustible anual flota tradicional.....	65
Figura 47: Consumo de combustible anual flota TA caso de estudio.....	66
Figura 48: Consumo de combustible anual flota TA caso full.....	66
Figura 49: Iteración de VAN de acuerdo con el número de pantógrafos.....	69
Figura 50: Diferencia de tiempos de ciclo.....	71
Figura 51: Aporte de productividad sistema TA.....	71
Figura 52: Cantidad de equipos tradicionales y TA.....	72
Figura 53: Ahorro de consumo de combustible anual caso de estudio.....	72
Figura 54: Ahorro de emisiones de CO2 con tecnología TA caso de estudio.....	73
Figura 55: Aporte de descarbonización de tecnología Trolley Assist anual caso de estudio.....	73

Índice de tablas

Tabla 1: Distribución de tiempos norma asarco.....	24
Tabla 2: Velocidades máximas de giro.	42
Tabla 3: Velocidades máximas en pendiente.	42
Tabla 4: Valores de tiempos de maniobras.....	43
Tabla 5: Costos de inversión por unidad.....	43
Tabla 6: Costo de equipo de transporte KOM930-E5.....	43
Tabla 7: Recomendaciones al evaluar implementación de Trolley Assist.	47
Tabla 8: Características rampas botadero norte.	49
Tabla 9: Características rampa botadero sur.	49
Tabla 10: Valores de parámetros de simulación determinística de extensiones máximas. ...	50
Tabla 11. Tarifas promedio de parámetros.	53
Tabla 12: Potencial aporte económico de rampa.	53
Tabla 13: Rampa BOT_NE para evaluación económica.	54
Tabla 14: Rampa BOT_SN para evaluación económica.	54
Tabla 15: Detalles de CAPEX durante el periodo de la mina.	67
Tabla 16: Evaluación caso de negocio.	68
Tabla 17: Resultado de indicadores financieros para caso de estudio.	68
Tabla 18: Resumen potencial aporte rampas candidatas.	70

Siglas y términos técnicos

- **CAEX:** hace referencia a los “Camiones de Extracción”, es un camión minero de gran tonelaje que es denominado de esta forma para la minería de gran escala.
- **KPI:** son indicadores claves de rendimiento que se utilizan para evaluar el éxito de las acciones que se realizan en un tipo de industria, en este caso la industria minera.
- **Catenaria:** se refiere a los cables aéreos que entregan corriente a los distintos tipos de transporte que se conectan a esta línea. Los cables suministran la energía necesaria para poder poner en marcha a los equipos o mantener su movimiento.
- **Pantógrafo:** es un sistema articulado de barras que permiten la conexión y desconexión eléctrica a las catenarias para poder suministrar la energía al equipo móvil que lo tiene instalado.
- **Retrofit:** se refiere a la a adición o modernización de componentes de la tecnología de una maquinaria. Para casos de este estudio se refiere a la adición de toda la infraestructura de la tecnología *Trolley Assist* en un equipo de transporte minero.
- **Convertidor AFE:** es un variador de frecuencia que permite entregar una alimentación de energía controlada e inyección de reactivos a la red para mejorar los factores de potencia.
- **Trolley Assist (TA):** es un sistema utilizado por equipos mineros de alto tonelaje, que aprovechan la energía eléctrica de una línea de catenaria en lugar de su motor diesel. Esta tecnología ayuda a la disminución de consumo de combustible, siendo una alternativa para las iniciativas de descarbonización que tienen la mayoría de las mineras.
- **CAPEX:** se refiere a inversiones de capital destinadas a la adquisición, mejora o mantenimiento de activos físicos o productivos, que buscan generar beneficios a futuro. Estas inversiones suelen estar asociadas con activos que se utilizaran durante la vida útil del proyecto, como maquinaria, equipos, infraestructura o tecnología.
- **Ralentí:** hace referencia cuando un motor tiene un consumo mínimo de combustible, que la mayoría de las veces es cuando este encendido sin aplicarle alguna exigencia al motor.
- **Inpit:** se refiere a operaciones que ocurren dentro del tajo o dentro de la mina de cielo abierto.
- **Expit:** son actividades de operación que ocurren fuera del tajo o exterior a la mina de cielo abierto, que van desde el botadero como también la planta de la mina.

1 Introducción

En el contexto de la problemática mundial del cambio climático, muchos países se comprometen a limitar el calentamiento global. Desde el “Acuerdo de París”, realizado en 2015, se destacó que la minería contribuye entre un 4 % y un 7 % de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) a nivel mundial. En consecuencia, las empresas mineras buscan alternativas para poder descarbonizar sus operaciones mediante alternativas que consideren electrificar y reemplazar el consumo de combustible diesel (Delevingne *et al.*, 2020).

Según el “Anuario de estadísticas del cobre y otros minerales” realizado por COCHILCO (2022), se señala la distribución de emisiones directas e indirectas de GEI en la minería del cobre en Chile el 80% aproximadamente son emitidas en el rajo. Dicha distribución se muestra en la Figura 1, donde de ese 80 % estas se atribuyen a transporte y trituración de minerales principalmente.

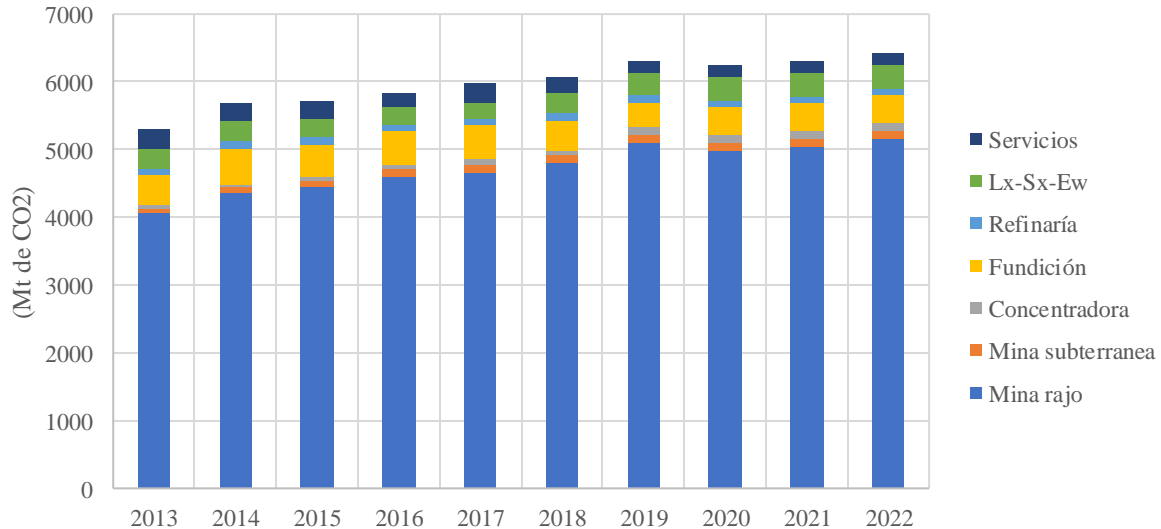


Figura 1: Emisiones directas e indirectas por proceso en la minería del cobre en Chile (COCHILCO, 2022).

Aunque la mayoría de estas tecnologías de descarbonización dicen estar disponibles, estas deben madurar para poder implementarse en las distintas mineras del mundo y poder ser validadas por grandes empresas. La industria está demostrando un compromiso a largo plazo para reducir las emisiones de gases contaminantes, con la ambiciosa meta de lograr la descarbonización total para el año 2050, como por ejemplo BHP o AMSA, que se comprometen en llegar para esas fechas a la neutralidad de carbono¹. Gran parte de estas emisiones provienen de la minería de rajo abierto como se muestra en la Figura 1, en donde el 73% de estas emisiones corresponden al transporte de material (COCHILCO, 2022).

¹ Se refiere a conseguir emisiones de dióxido de carbono netas iguales a cero.

La tecnología *Trolley Assist* es un sistema utilizado por los equipos mineros de gran tonelaje para aprovechar la energía eléctrica de una línea de catenaria, el cual abastece los motores eléctricos de tracción en lugar de depender de la fuente de energía que les proporciona el motor diesel. Contribuye a la ayuda de disminuir el consumo de combustible, además de prolongar el uso de los motores de combustión diésel, siendo una alternativa para las iniciativas de descarbonización que tienen la mayoría de las mineras.

Sin embargo, la implementación del sistema *Trolley Assist* requiere ciertas consideraciones previo a su instalación. Algunas consideraciones importantes son los tamaños de pistas, requerimiento eléctrico, costos de operación e inversión, reducción de consumo de combustible, entre otros, lo que hace importante evaluar distintos parámetros técnicos y económicos.

Este trabajo consiste en una evaluación técnica, económica y ambiental de una solución con la tecnología *Trolley Assist* en una minera de cielo abierto ubicada en Chile. En esta se evaluarán los requerimientos para implementar la tecnología, considerando resultados técnicos esperados, resaltando el ahorro de combustible y su reducción de emisiones comparándolo con el caso convencional.

2 Objetivos y alcance

2.1 Objetivo Principal

- Evaluar la solución *Trolley Assist* en términos técnicos, económicos y ambientales en una minera de cielo abierto en Chile.

2.2 Objetivos Específicos

- Realizar una descripción general de la tecnología TA, con sus ventajas y desventajas.
- Comparar los rendimientos y resultados técnicos del caso con la flota tradicional y la flota con la tecnología TA.
- Comparar el consumo de combustible y emisiones emitidas con la flota tradicional y la flota con tecnología.
- Evaluar económicamente la implementación del uso de la tecnología TA.

2.3 Alcance

Para la realización de este estudio se evaluará la solución económica en una mina a rajo abierto ubicada en Chile. Considerando como alcance los siguientes puntos:

- En este estudio conceptual se analizarán los datos necesarios que permitan corroborar que la eficiencia de los KPI's operativos, para que puedan viabilizar el CAPEX de la tecnología *Trolley Assist*.
- La selección de proveedores de camiones y todo lo asociado a la instalación eléctrica que involucra la tecnología *Trolley Assist*, no entran a evaluarse para efectos de este estudio.
- El tipo de camión para el transporte de material considerado es un KOM930-E5.
- Para aplicar la tecnología TA, esta será evaluada solo para rampas expit dentro de los límites de la mina.
- Este trabajo considera el análisis de solo una rampa en simultaneo.

3 Antecedentes

Una tecnología que ha surgido como una solución potencial, es la asistencia de carros denominada *Trolley Assist*. Esta permite una aplicación bidireccional en el uso de la subestación, posibilitando la retroalimentación de energía a la red eléctrica, como el suministro de energía eléctrica hacia los motores de tracción.

El *trolley* en ferrocarriles se utilizaba para el transporte de material en el pasado, con el tiempo esta fue remplazada por el sistema de camiones, debido a su gran flexibilidad y manejo. En la actualidad ambos sistemas se han integrado, para obtener una mayor potencia en los motores eléctricos de los CAEX, dando oportunidades en las rutas con altas pendientes, que los camiones suban a mayor velocidad. Los camiones al estar conectados a la catenaria, su motor diésel se encuentra en ralentí y el consumo de combustible se reduce de manera importante, aproximadamente en un 95 % durante estos trayectos (Siemens AG, 2019). Otros factores que aporta esta tecnología son:

- Reducción de consumo de combustible.
- Disminuye las emisiones de CO₂.
- Posible reducción de flota de camiones por aumento de velocidad en los tramos.
- Mejor rendimiento en pendientes más fuertes.
- Posible reducción de costos de mantenimiento de camiones.

Es por esto que el sistema TA ha demostrado ser especialmente efectivo en la optimización de la eficiencia energética y la reducción de las emisiones. En una evaluación realizada en el norte de Chile para una flota de 70 camiones CAEX, se demostró que al aplicar *Trolley Assist*, se logró un aumento del 44 % en la velocidad de camiones, una reducción del 16 % en el tiempo de viaje y un ahorro de más del 80 % de combustible en cada ciclo de subida y bajada (Valenzuela *et al.*, 2018).

Por otro lado, en un análisis de tecnologías que se presentan como aporte a la descarbonización, se comparó la tecnología *Trolley Assist* con la flota de tradicional de diesel en un perfil de transporte minero, en donde la demanda de energía de diesel presentaba valores cercanos a los 681 (kWh) mientras que la demanda de TA disminuía a 511 (kWh), existiendo un ahorro de consumo de energía (Haiming Bao *et al.*, 2024).

La tecnología *Trolley Assist* brinda propulsión al estar conectado a la línea eléctrica, pero estudios muestran que estos también pueden generar cargas dinámicas al estar conectados. Específicamente para los casos de la tecnología *Battery Trolley*, que es una combinación de tecnologías de almacenamiento de energía y uso de *Trolley Assist*, muestra que no es muy provechoso a nivel de productividad realizar cargas dinámicas, que para casos de esta tecnología es más productivo la carga estática (Haiming Bao *et al.*, 2023).

Continuando con el tema de carga dinámica que ofrecen las líneas eléctricas de *Trolley Assist*, se observó una relación de energía en cada ciclo de 3,7:1 en el balance energético. La razón 3,7:1 significa que por cada 3,7 camiones descargados que descienden por la ruta, se puede reunir suficiente energía para subir un camión cargado por la misma, lo que indican que en la mayoría de los casos no es lo suficientemente rentable utilizarse para el descenso en la mina (Valenzuela *et al.*, 2018).

El consumo de combustible en las zonas de alta pendiente representa desde el 70 al 80 % del consumo total de combustible. Se observan recuperaciones de inversión a los 2 o 3 años de producción. Es importante señalar que los componentes de *Trolley Assist* se pueden ampliar, desmontar o mover con facilidad, incluso luego de muchos años de funcionamiento. Las tiras de carbono establecen el contacto entre los pantógrafos y los cables de contacto aéreos. El gradiente para que los CAEX se conecten van desde 6 a 10°, en donde se observan los mejores rendimientos (Siemens AG, 2019).

3.1 Proceso de transporte en la gran minería

La minería es una actividad económica que consiste en la explotación o extracción de minerales. Luego de que un depósito es descubierto y explorado, se debe pensar en cómo poder extraer tal mineral, existiendo hoy en día una amplia variedad de métodos de extracción, entre los que se destacan; métodos subterráneos o cielo abierto. La minería de cielo abierto es uno de los métodos más clásicos de extracción u operación en los últimos tiempos, este extrae una envolvente desde la superficie terrestre que trata de maximizar el beneficio económico para poder extraer el mineral que es comercialmente rentable.

En la gran minería de cielo abierto, el sistema de transporte tradicional consiste principalmente de camiones diésel, los cuáles se someten a difíciles condiciones del entorno, enfrentando en conjunto la seguridad del sector con la demanda de la producción de la mina. Los costos de transporte corresponden al 45 % de la operación mina en un sistema tradicional pala-camión, en donde los costos más importantes van asociados a consumos de combustible y repuestos (Parra, 2015).



Figura 2. Equipo de transporte de alto tonelaje (mineriaenlinea.com)

3.2 *Trolley Assist* (TA)

Esta tecnología nació en África a mediados de la década de los 80s, enfrentando una crisis económica entre 1981 y 1982, conocida como la crisis del petróleo, lo que obligo a la mayoría de las compañías mineras a reducir sus costos de energía. El origen de esta implementación nació de la tecnología de los trenes europeos que funcionaban en base a electricidad, por lo que, se trabajó en adaptar el camión con pantógrafos y las rampas con línea eléctrica para conectarse (ver Figura 3), sin perder la flexibilidad con la que cuentan los camiones, reduciendo el consumo de diesel en el transporte de material. En 1994, la tecnología es probada en distintas minas de Estados Unidos, quedando como una tecnología ya validada e implementada en distintas minas en el mundo.

El propósito de un sistema *Trolley Assist* es reemplazar el combustible diésel por energía eléctrica. Gracias a las características del sistema de tracción de los camiones, esto se puede lograr, ya que la electricidad a través del motor diésel y el generador eléctrico a bordo del camión, es remplazada por una planta generadora y transmitida mediante líneas de alta tensión hasta subestaciones cercanas a la operación de los equipos. La subestación recibe y transforma la tensión para enviarla a las líneas de contacto suspendidas sobre la ruta, conocidas como catenarias. El equipo equipado con la tecnología TA cuenta con un pantógrafo que capta la energía eléctrica de la catenaria para alimentar los motores eléctricos de tracción del camión. La ilustración muestra la conexión entre un camión diésel-eléctrico y una línea del sistema *trolley*.



Figura 3: CAEX conectado a línea Trolley Assist en Suecia (miningmagazine.com).

El impacto positivo que ofrece esta tecnología se destaca principalmente en las zonas o países, donde el costo de la energía eléctrica es más económico que el costo de diésel, además de que la energía utilizada provenga de fuentes renovables.

En primer lugar, se debe estudiar las rutas en las cuales se transite la mayor cantidad de tonelaje, además que tengan pendientes pronunciadas al subir cargado y extensiones largas, ya que son los lugares en donde la tecnología consume la mayor cantidad de combustible. Los pantógrafos a bordo son los encargados de conectar los sistemas de transmisión del camión a la línea eléctrica aérea en modo de *trolley*, aprovechando la mayor eficiencia de los motores eléctricos de tracción.

Otro de sus beneficios es el aumento de velocidad en los perfiles de transporte, con respecto a la velocidad del camión subiendo en pendiente, esta se encuentra limitada por la potencia de su motor diesel, en cambio mediante la conexión a una línea eléctrica o a la catenaria mientras sube en pendiente, puede alcanzar mayores velocidades. En la Figura 4 se puede apreciar la diferencia de las curvas *rimpull* del equipo con retrofit que tiene el sistema *trolley* y otra con el equipo convencional. Un ejemplo de esto es el ascenso que realiza el camión cargado aplicando una fuerza de 60 000 (kgf)²; mientras que el equipo convencional alcanza una velocidad de 10,4 (km/h), el equipo con *Trolley Assist* logra alcanzar una velocidad de 21,5 (km/h), mostrando una clara ventaja.

² Considerando una fuerza de 60000 (kgf) y la ecuación de fuerza de empuje $Rimpull = GVW * (\%P + \%R.R.)$, se asume un valor de $RR = 2\%$ y un $GVW = 505\ 755$ (kg) se determina que el equipo está subiendo una pendiente de 9.9% aproximadamente.

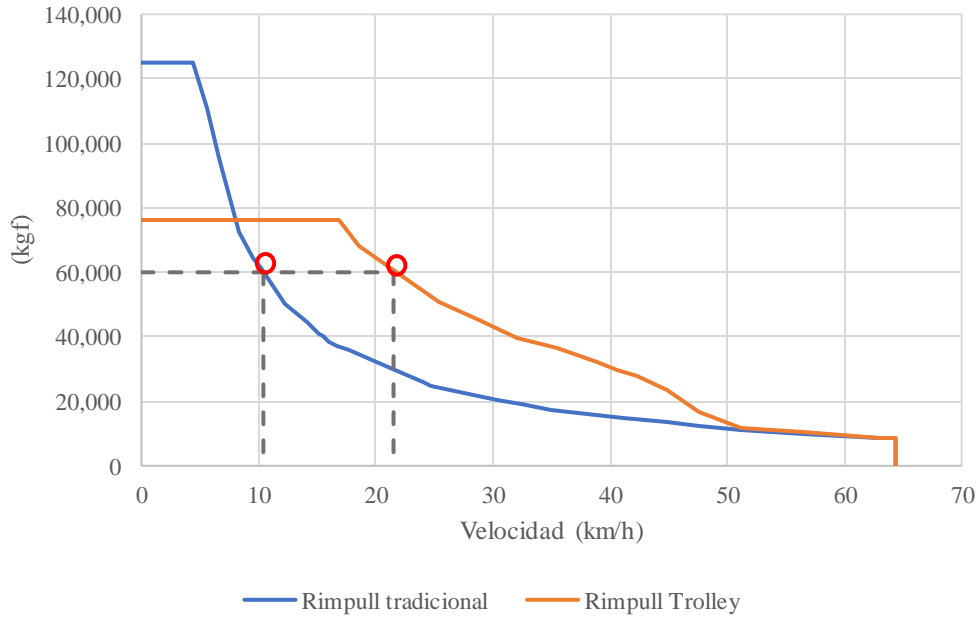


Figura 4: Curvas rimpull de equipo KOM930 (Tellus-mining).

Por otro lado, la longitud y la pendiente de la ruta son importantes para poder aprovechar la ventaja de aumento de velocidad. Idealmente las rampas para generar beneficios son recomendadas subir con pendientes superiores al 7 % para optimizar su rendimiento, ya que sobre estas pendientes se observan reducciones importantes en el consumo de combustible (Siemens AG, 2019).

Según estudios realizados muestran que la mayor parte del consumo de combustible lo realizan subiendo pendientes vacíos y cargados, además de aumentar por sobre el 50 % la potencia de los motores de tracción eléctricos. La electrificación completa de la mina puede ser una solución viable para descarbonizar, pero el desafío es el significativo gasto que requiere. Ante esto es necesario plantear estrategias para poder encontrar las rampas candidatas que disminuyan la mayor cantidad de emisiones posible (Los Pelambres AMSA, 2022).

3.3 Operación con *Trolley Assist*

De forma simplificada, la Figura 5 ilustra la operación con y sin tecnología *trolley*. Respecto a la operación con *trolley*, en el mejor de los casos el camión sube a una pendiente alta (entre un 7 a 10 %) aprovechando la potencia de su motor que se complementa con la admisión de energía eléctrica a través del contacto entre el pantógrafo y las líneas aéreas de corriente, para luego continuar con el resto de su ciclo. En la parte derecha de la Figura 5 se muestran las diferencias de operación al adaptar una rampa en subida con *Trolley Assist*.

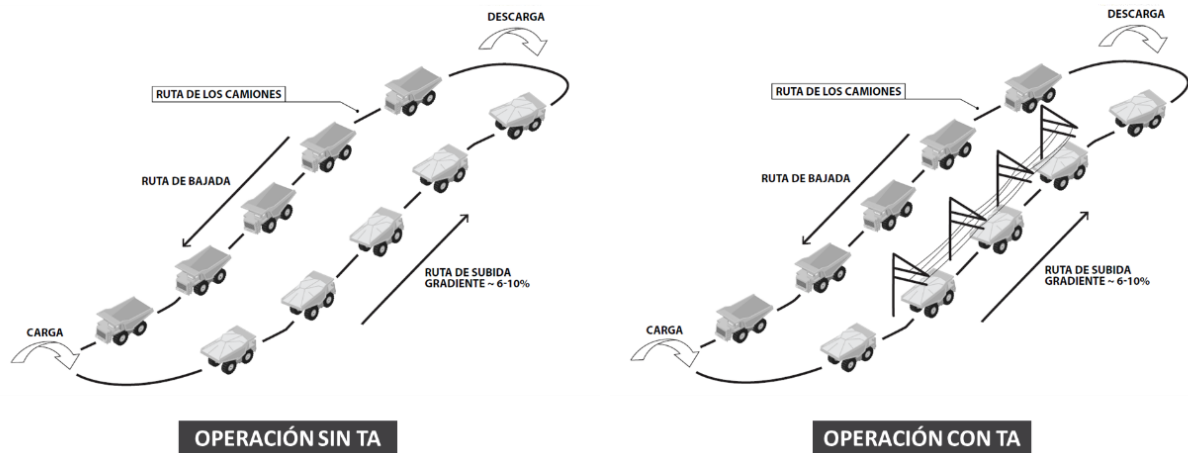


Figura 5: Operación de los camiones de extracción con y sin *Trolley Assist* ((Mazumdar, *Performance Improvement of Mining Haul Trucks* , 2011)).

En consecuencia, para cada operación minera, y dependiendo de su plan minero, se deben considerar los siguientes ítems:

- Sistema de catenaria
- Subestaciones rectificadoras.
- Postaciones de cables eléctricos.
- Línea de transmisión hacia subestación.
- Kit de retrofit (depende de la cantidad de equipos).
- Desarrollos de ingeniería en tecnología/implementación.

Por su parte, en la Figura 6 se presenta la configuración general del sistema eléctrico. Con el propósito de alcanzar una alta disponibilidad operacional, el sistema de catenaria requiere tensionamiento automático, de forma tal de garantizar que los cables de contacto y los cables mensajeros estén cargados con la misma fuerza de tensión en todo momento, independientemente de las condiciones operativas y ambientales. Asimismo, otro elemento de diseño para la implementación específica es la tensión mecánica de los cables de contacto, los cuales permiten un cable totalmente recto y horizontal que evita el pandeo, lo que garantiza una conexión continua entre el pantógrafo y la línea aérea de contacto.

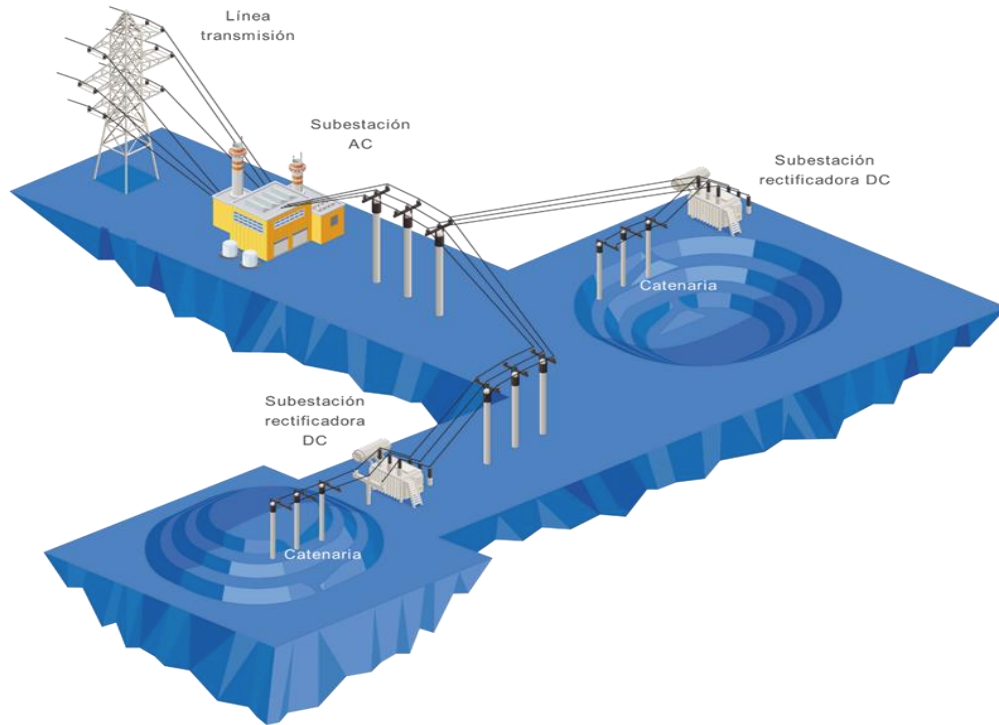


Figura 6: Infraestructura eléctrica TA (Tellus-mining).

Comparada con la transmisión mecánica tradicional, conversor de torque y diferencial, una de las ventajas de usar tracción eléctrica en los camiones de transporte minero es la posibilidad de recolectar energía desde líneas *trolley* suspendidas y, gracias a ello, evitar o suplementar al motor diésel como fuente de energía del camión (ver Figura 7).

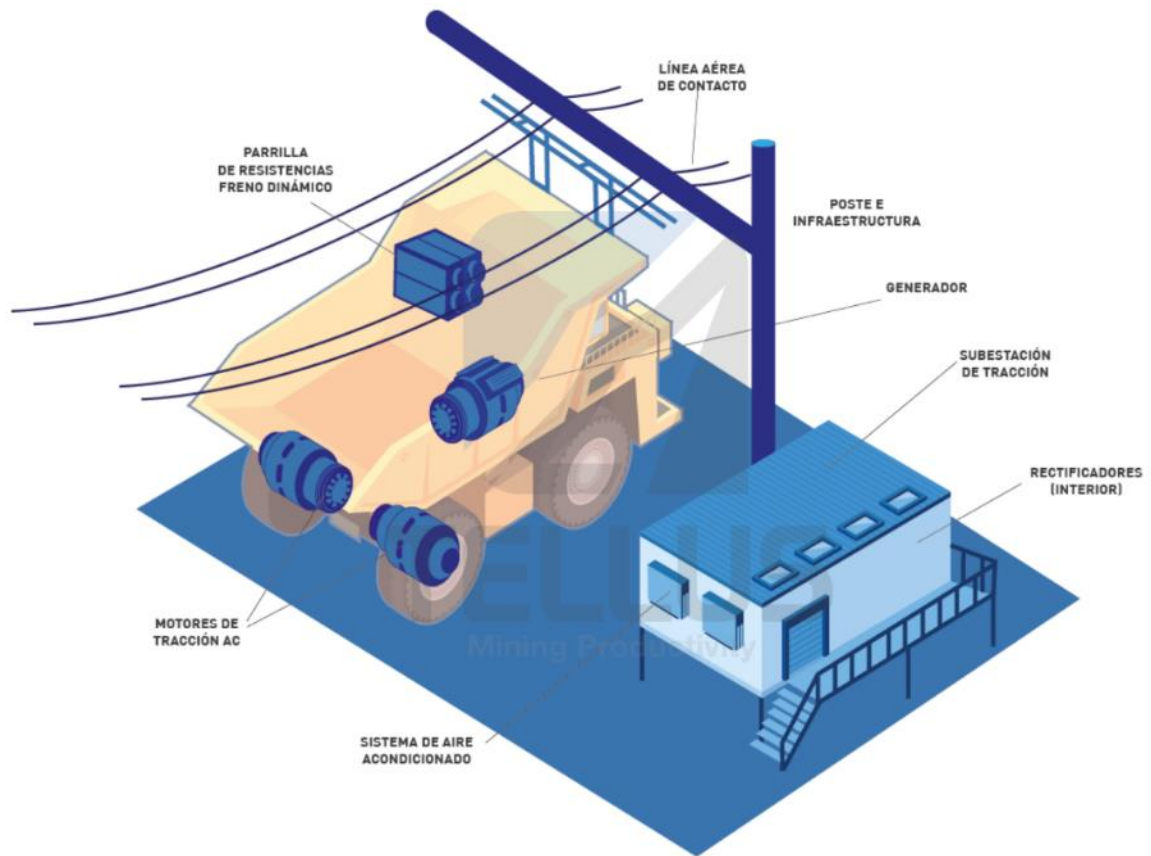


Figura 7: Infraestructura eléctrica y camión TA (Tellus-mining).

En la Figura 8 se ilustra el retrofit de camiones con tecnología TA, detallando la instalación específica de un modelo completo al 100%, con el pantógrafo en funcionamiento y la tolva adaptada para garantizar una operación eficiente al momento de alzarlos a la línea eléctrica.

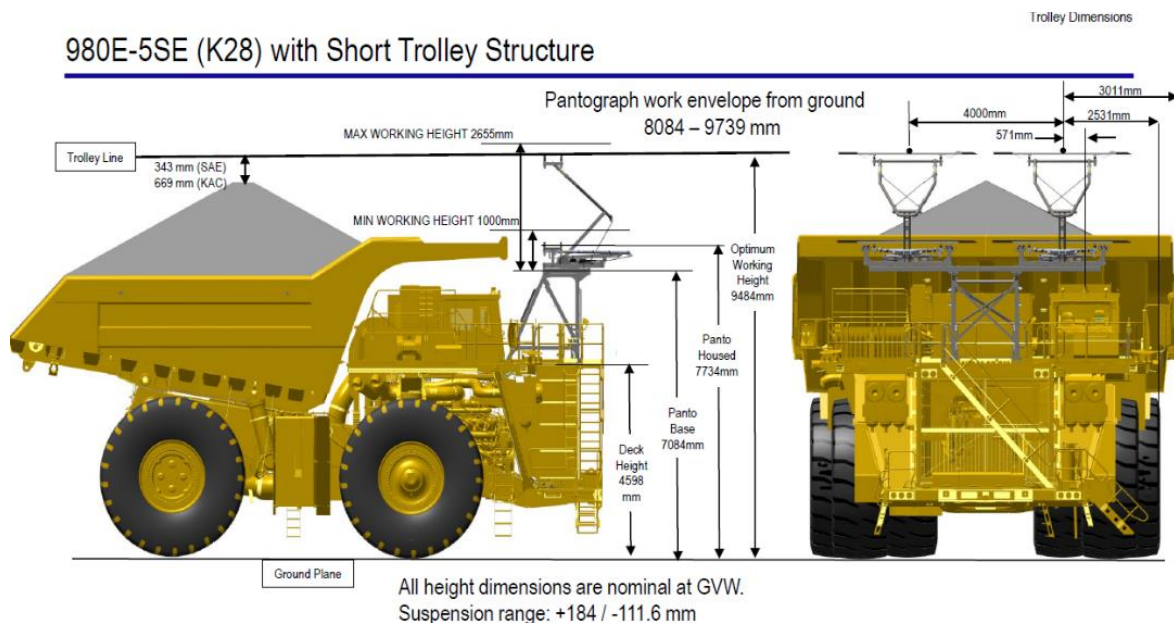
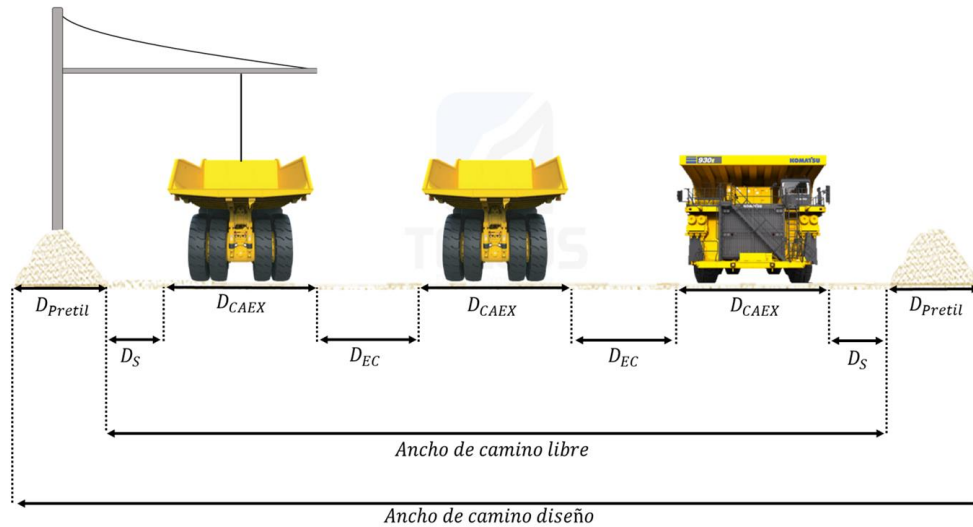


Figura 8: Dimensión preliminar (Komatsu Holding South America Ltda.).

Los equipos TA experimentan ventajas como el incremento en la velocidad y en la reducción en las emisiones al permanecer conectados. Respecto al ancho del camino, los proveedores recomiendan disponer de al menos tres pistas. Al estar configuradas con solo dos pistas, esta puede estar propensa a interferencias operativas, debido a las diferencias de velocidad entre los CAEX con pantógrafo y aquellos que no lo poseen.

Las consideraciones de diseño relacionadas con los anchos de camino deben ser minuciosamente evaluadas teniendo en cuenta el entorno en donde se realizan, como se muestra en la Figura 9. La incorporación de las postaciones y la habilitación de una tercera pista generan un aumento en el ancho de rampa, lo cual afecta el aumento de movimiento de material, que es algo importante para la evaluación económica de la mina.



$$\begin{aligned} \text{Ancho de camino libre} &= 3 * D_{CAEX} + 2 * D_{EC} + 2 * D_S \\ \text{Ancho de camino diseño} &= 3 * D_{CAEX} + 2 * D_{EC} + 2 * D_S + 2 * D_{Pretil} \end{aligned}$$

Figura 9: Diseño de camino, caso ideal (Tellus Mining).

En cuanto a la temporalidad de la rampa *trolley*, este ítem se relaciona con la inversión en infraestructura, específicamente, en mantener y usar la infraestructura evitando así la reinstalación o remociones. En este contexto, generalmente los casos de negocios se levantan considerando el tonelaje que mueve la rampa durante todo este periodo, es importante que la rampa contenga un movimiento continuo de material y una cantidad que permita el mayor uso de la tecnología (conexión entre pantógrafo y línea aérea de energía), es decir que el número de veces que pasa el camión por el sistema *Trolley Assist* sea la mayor posible, teniendo un mayor uso de la tecnología. Bajo todas las consideraciones importantes que optimizan el mejor escenario para el sistema, el material acumulado de transporte nos entrega el máximo valor de camiones para poder instalar la tecnología, donde es importante que muestre movimiento continuo de material. Mientras que más se utilice el sector, mayores serán los beneficios a largo plazo.

3.4 Norma Asarco

La *American Smelting and Refining Company* o más conocida por sus siglas iniciales ASARCO, es el marco de referencia utilizado para la definición de conceptos y distribución de los tiempos en que los equipos, maquinas o instalaciones que incurren en la operación. Con los adecuados ajustes a la realidad operacional de la mina, pondera una serie de variables y proporciona indicadores de rendimiento de los equipos empleados en la extracción, en el beneficio y la industrialización de los minerales (Codelco Chile, 2005).

En la categoría de distribución de los tiempos, desde un tiempo nominal el cual corresponde a un periodo total de medición que se desea medir, estos pueden ser por turnos, días, meses o años. Estos tiempos son claves para poder conocer los indicadores de rendimiento, los cuales se especificaran mas adelante. La Tabla 1 muestra la distribución de los tiempos que establece la norma asarco.

Tabla 1: Distribución de tiempos norma asarco.

Tiempo nominal (TN)			
Tiempo disponible (TD)			No disponible o fuera de servicio (TF)
			Programadas (TFP)
Tiempo operativo (TO)			Reservas (TR)
Tiempo efectivo (TE)	Perdidas operacionales (PO)	Demoras (D)	
		Programadas (DP)	No programadas (DNP)

- 1) **Tiempo nominal:** se refiere al tiempo total del periodo de medición (pueden ser turnos, días o meses).
- 2) **Tiempo disponible:** tiempo en que el equipo esta mecánicamente habilitado para poder trabajar.
- 3) **Tiempo no disponible o fuera de servicio:** en este tiempo el equipo no se encuentra disponible para realizar sus funciones por presentar fallas o encontrarse en mantención, este tiempo se divide en fallas **programadas** e **imprevistos**.
- 4) **Tiempo operativo:** es el tiempo durante el cual el equipo esta con el operador realizando alguna labor dentro de la mina.
- 5) **Tiempo de reservas:** tiempo en que el equipo se encuentra mecánicamente habilitado, pero no está siendo utilizado en operación.

- 6) **Tiempo de demoras:** son interrupciones acontecidas en el proceso productivo en la mina, estas se dividen en demoras programadas y no programadas:
- Demoras programadas: están presentes en turno de operación, entrada y salida de turno o colación.
 - Demoras no programadas: pueden o no estar presentes en la operación turno a turno, como lo pueden ser las tronaduras, el petróleo o arregles en las canchas.
- 7) **Tiempo efectivo:** es el tiempo en que el equipo se encuentra realizando labores para la cual fue diseñado. Para el caso de un camión minero el tiempo efectivo se refiere a considerar:
- Tiempo cargando.
 - Tiempo viajando cargado.
 - Tiempo descargando.
 - Tiempo viajando vacío.
 - Tiempo aculatando (tiempo spot).
- 8) **Tiempo en pérdidas operacionales:** son tiempos operativos en los cuales el equipo no está cumpliendo las labores para el cual fue diseñado, no son parte del tiempo dentro del ciclo de operación, por ejemplo:
- Camiones esperando por equipos de carguío.
 - Espera de camión en plataforma o botadero para poder descargar.
 - Cargador en espera de camión.

Esta distribución de tiempos es fundamental para poder entender y saber cómo utilizar los indicadores de rendimiento. A continuación, se señalarán los KPI's más utilizados en la industria minera, a excepción de algunas mineras que consideran las pérdidas operacionales en el tiempo. Las siguientes formulas conversan con las nomenclaturas utilizadas en la Tabla 1:

- 1) Disponibilidad:

$$Disp. (\%) = \frac{TE + PO + TR}{TN} * 100 \quad (1)$$

- 2) Utilización:

$$Util. (\%) = \frac{TE}{TN} * 100 \quad (2)$$

- 3) Utilización efectiva:

$$Util. Efe. (\%) = \frac{TE}{TD} * 100 \quad (3)$$

4) Utilización operativa:

$$Util, Oper. (\%) = \frac{TO}{TD} * 100 \quad (4)$$

5) Demora no programada:

$$Dem. NP. (\%) = \frac{DNP}{TD} * 100 \quad (5)$$

6) Perdidas operacionales:

$$Perd. Oper. (\%) = \frac{PO}{TD} * 100 \quad (6)$$

3.5 Cálculo de flota de transporte

Para el cálculo de la flota de transporte se debe considerar el tiempo efectivo que realiza el camión dentro de su operación que se basa netamente en el tiempo de ciclo de este mismo, por lo que es importante poder conocer el detalle de cada uno, en donde es necesario contar con los perfiles de cada ruta y las velocidades de los equipos, tanto cuando van cargados como descargados en pendientes de subida, en bajada, en plano y en las curvas.

1) Tiempo de viaje (TV):

$$TV (hrs) = TV. Cargado + TV. Descargado \quad (7)$$

2) Tiempo de maniobras (TM):

$$TM (hrs) = TM. Acuatamientos + Tcarga + Tdescarga \quad (8)$$

3) Tiempo de ciclo (TC):

$$TC (hrs) = TM + TV \quad (9)$$

Luego de conocer los tiempos es necesario poder obtener los rendimientos de los equipos donde se deben conocer la capacidad del equipo de transporte (Ct), las horas de trabajo por turno (HT) y los turnos que se realizan durante el día (TD). Todos los rendimientos sirven para el cálculo de la flota de transporte en los diferentes periodos, conociendo los días por periodo de transporte (DPC) se puede realizar el cálculo de numero de equipos (NE) teniendo en consideración el movimiento de material de cada periodo (T).

4) Rendimiento horario (RHt):

$$RHt (t/h) = \frac{Ct \times Disp. \times Util.}{TC} \quad (10)$$

5) Rendimiento diario (RDt):

$$RDt (t/d) = RHt \times HT \times TD \quad (11)$$

6) Rendimiento por periodo (RPt):

$$RPt (t/periodo) = RDt \times DPC \quad (12)$$

7) Numero de equipos (NE):

$$NE = \frac{T}{RPt} \quad (13)$$

3.6 Herramientas de simulación para tiempo de ciclo de transporte

El software Haul Infinity se emplea para optimizar el transporte en la minería, facilitando la planificación operativa, estudios de viabilidad y estimaciones de costos. Entre sus capacidades se encuentran el cálculo de tiempos de viaje, ciclos de transporte, perfiles de elevación y velocidad, así como la carga del motor, el consumo de combustible y electricidad de la flota de transporte.

La configuración del programa contiene una serie de pasos para completar y ejecutar el modelo donde se deben ingresar la configuración general, cargar los camiones que se utilizarán de acuerdo con su modelo y sus limitaciones dentro de la mina, los materiales, cargadores y parámetros importantes de operación. Luego de tener nuestro modelo cargado y sus configuraciones, Haul Infinity nos habilita un espacio de trabajo principal, en donde puedes dibujar o cargar una red de carreteras en 3D, sobre topografías existentes e interactuar con ella para crear nodos y perfiles de transporte.

Para integrar datos específicos de una operación minera, el simulador permite la importación de nodos en formato CSV, segmentos en CSV o DXF, y sólidos o bloques. De igual forma, se pueden exportar estos archivos, junto con tiempos de viaje o ciclos en CSV, ciclos de transporte en XML, y cadenas de ciclo de transporte.

El tiempo de ciclo que calcula el camión viene siendo el tiempo que se tarda un camión en completar un viaje de ida y vuelta entre dos puntos de su recorrido, considerando tiempos de carga, espera y descarga que tiene el equipo según de cómo se configure. Otra herramienta útil que se proporciona es poder importar equipos desde catálogo y editarlo según los diferentes requerimientos que el equipo contenga. Se puede definir si el equipo es mecánico diesel, híbrido, con sistema *trolley* o con un conjunto de baterías.

Esta herramienta en general sirve para proporcionar datos importantes de transporte, entre otras aplicaciones tales como:

- Construir y editar redes de transporte con herramientas de diseño.
- Visualizar e incorporar distintos tipos de señaléticas, intersecciones y áreas de interés en el mundo virtual tal como están en la realidad.
- Utilizar secuencias de trabajos lógicos para solucionar problemas en las redes de tránsito.

Este software entrega facilidad para la creación, análisis y preparación para redes de transporte dinámicas en el futuro, ayudando a otras herramientas de planificación para tomar decisiones más eficientes y confiables.

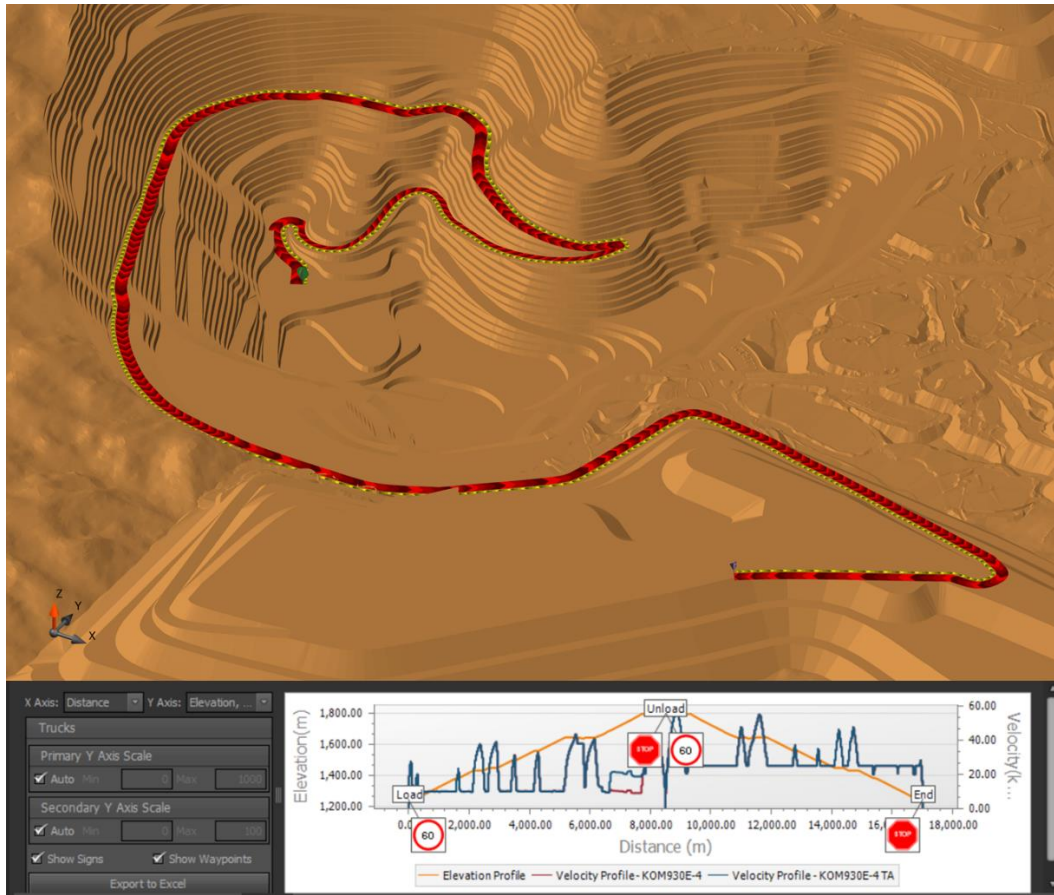


Figura 10: Representación gráfica simulador Haul Infinity (Alastri Software, 2024).

En la Figura 10 se muestra una simulación de ruta de transporte, desde un origen en específico hasta su destino, en la parte inferior de la figura se puede observar el detalle de las velocidades de ciertos equipos, uno con TA y el otro sin. Representando las velocidades y la elevación del recorrido que realiza por sobre la topografía que se muestra.

Entre sus resultados destacan cálculos precisos de tiempos de ciclo para cada combinación de camión y pala, la productividad de cada equipo configurado, velocidades ajustadas a las condiciones de ruta y el consumo de combustible y energía eléctrica, además de identificar pendientes, calzadas superpuestas y configurar el coeficiente de rodadura de las rutas.

Entrega además características técnicas de cada una de las rampas, entregando los resultados de velocidad y de cómo se comportó en el viaje desde el origen hasta el destino. En la Figura 11, se observa un perfil de transporte donde aparece el recorrido del equipo de transporte KOM930 E-5, mostrando las diferentes velocidades y la elevación que tiene desde el punto de extracción de la mina hasta algún destino expit.

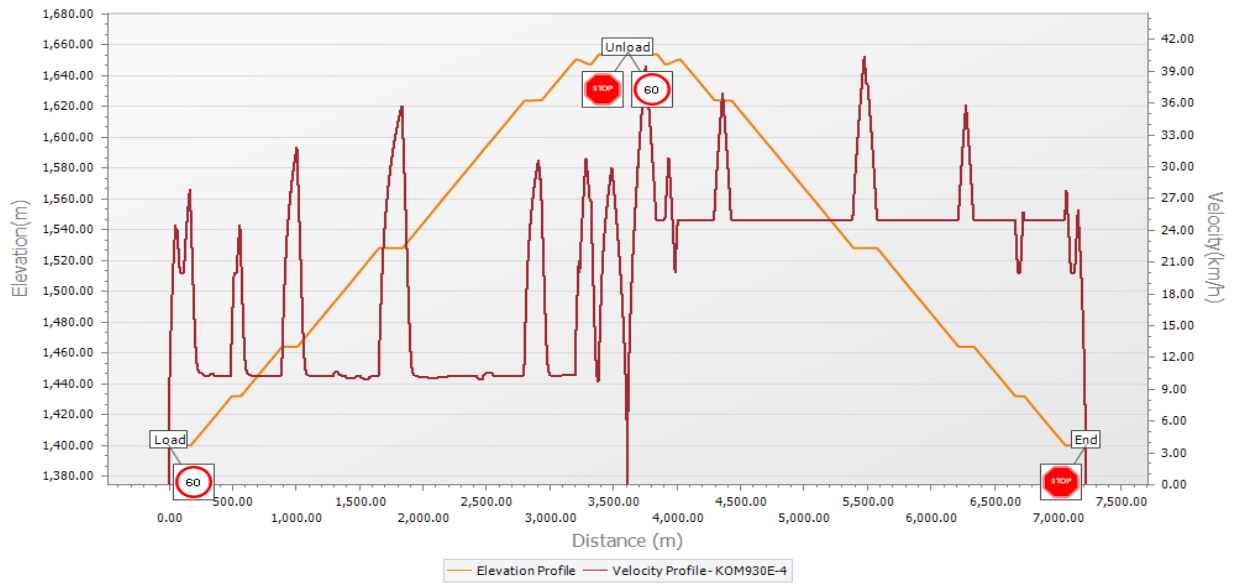


Figura 11: Perfil de velocidad y elevación de un origen y destino.

4 Metodología

La metodología propuesta para este trabajo consta de la evaluación de la implementación de un sistema de descarbonización a través de la tecnología *Trolley Assist* (TA). Para determinar su efecto y beneficio se realiza una comparativa con el caso base de la operación de una mina a rajo abierto tradicional.

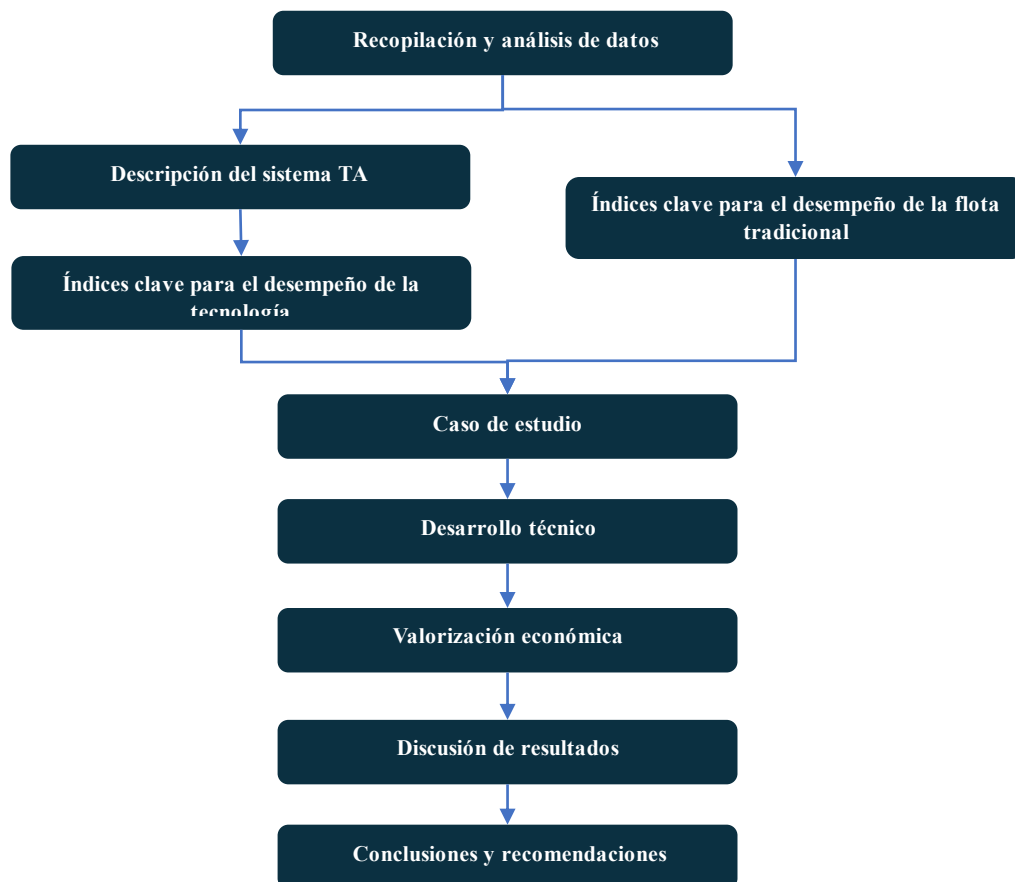


Figura 12: Metodología.

A continuación, se detallan los puntos involucrados en la metodología:

- **Recopilación y análisis de datos:** reunir la información de estudios realizados preliminarmente, tanto de la operación minera como también alcances que presenta la tecnología hoy en día.

- **Descripción del sistema TA:** detallar las características, cualidades y rasgos distintivos del sistema de transporte *Trolley Assist*, agregar estudios realizados con anterioridad sobre la tecnología y definir las características más importantes que se deben considerar para evaluar su implementación.
- **Índices clave para el desempeño de la tecnología:** definir los indicadores utilizados para evaluar el desempeño y la eficiencia de la flota con retrofit TA, basada en la norma ASARCO con el objetivo de calcular sus rendimientos o sus diferencias en el cambio de la flota de transporte.
- **Índices clave para el desempeño de la flota tradicional:** definir los indicadores utilizados para evaluar el desempeño y la eficiencia de la flota tradicional, basada en la norma ASARCO con el objetivo de calcular su rendimiento en base a los datos entregados por la mina.
- **Caso de estudio:** aterrizar y presentar los datos entregados para el análisis del estudio. Estos datos son detalles de la mina principalmente, el plan con el cual trabajan y los indicadores proyectados de su flota de transporte. Además de consideraciones importantes para la configuración de la simulación.
- **Desarrollo técnico:** evaluar mediante la simulación de la flota de transporte el impacto que tiene incorporar equipos *trolley* en una faena minera, rescatando diferentes cálculos técnicos, con los cuales se propondrá la mejor estrategia para poder implementarse y destacar las principales diferencias con la flota tradicional buscando una utilización óptima de los equipos con retrofit.
- **Valorización económica (CAPEX y OPEX):** evaluar la implementación del sistema *Trolley Assist* en uno de los mejores escenarios, buscando una utilización óptima de los equipos con TA y que pueda entregar los mejores beneficios económicos. Determinando la cantidad óptima de pantógrafos para poder finalizar con el cálculo de VAN del ejercicio a largo plazo.
- **Discusión de resultados:** examinar e interpretar los datos obtenidos desde la simulación hasta la evaluación económica, el comportamiento de los costos de inversión y beneficio económico que generan o no la implementación rentable de la tecnología.
- **Conclusiones y recomendaciones:** resumir los hallazgos y resultados obtenidos con el fin de proporcionar una guía práctica para la toma de decisiones sobre la implementación del sistema *Trolley Assist* en la flota de transporte, recomendar futuros estudios o consideraciones que se puedan rescatar de este estudio de valorización técnico-económica para motivar al objetivo de descarbonizar la industria minera.

4.1 Metodología desarrollo técnico

La metodología para el desarrollo técnico se explica en la Figura 13, la cual comienza desde los resultados de la simulación técnica hasta el ahorro de combustible al implementar la tecnología.

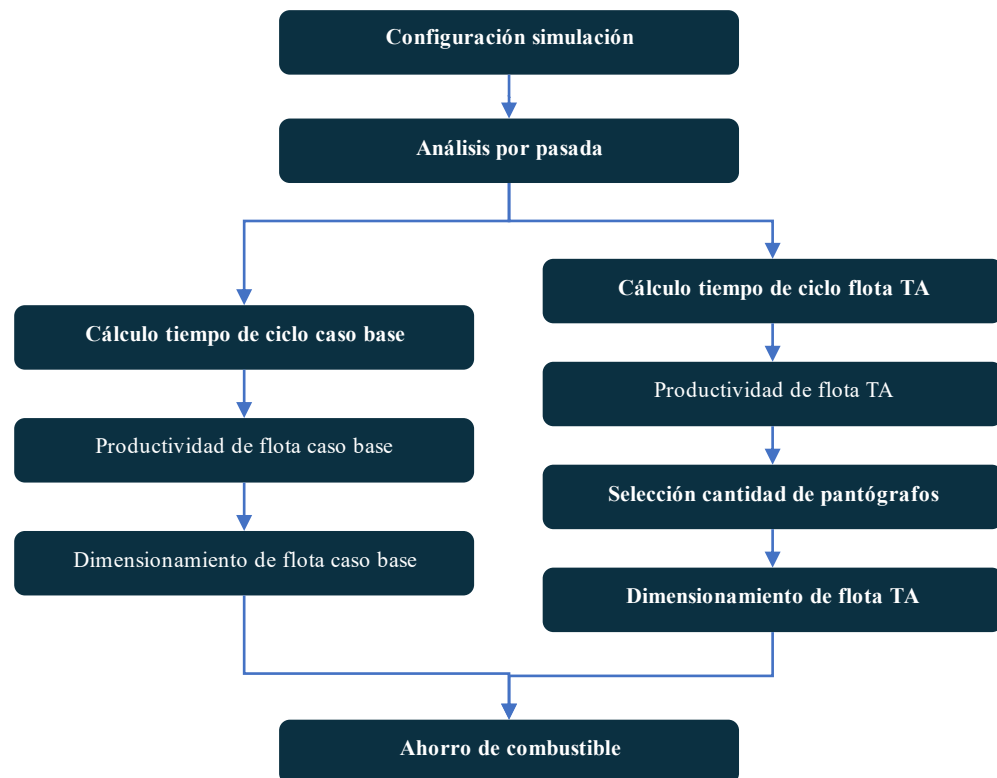


Figura 13: Metodología de desarrollo técnico.

- **Configuración simulación:** utilizar información de caso de estudio y plasmar en el simulador las rutas asignadas por plan. Dicho dibujo de rutas debe considerar el avance de la mina y la secuencia de crecimiento del botadero por las topografías año a año. Luego de tener la configuración realizar las simulaciones de origen destino, capturando la información técnica de cada ruta.
- **Análisis por pasada:** analizar a través de una simulación por pasada (ida y vuelta) los beneficios que ofrece cada rampa al instalar la tecnología, entre estos está el consumo de combustible, los aportes en velocidad con y sin la tecnología y la disminución del tiempo de ciclo. En base a estos datos, se deberá seleccionar la que ofrezca un mejor beneficio para escalar su instalación, el cual dependerá de cuanto material nueva por ese sector.

Utilizando las tarifas promedio de combustible, electricidad y CO2, se puede dimensionar el aporte monetario en USD que brinda la rampa, y con la cantidad de pasadas considerando el tonelaje que debe mover, la capacidad de aporte global de la mina. El cálculo de aporte por pasada es considerando la siguiente ecuación.

$$APP = (C_{sta} - C_{cta}) * Pc + (G_{sta} - G_{cta}) * Pg - E_{cta} * Pe \quad (14)$$

APP: Aporte por pasada (USD).

Csta: Consumo de diesel por pasada CAEX tradicional (l).

Ccta: Consumo de diesel por pasada CAEX con tecnología TA (l).

Pc: Tarifa de combustible promedio de la mina (USD/l).

Gsta: Emisiones de CO2 por pasada CAEX tradicional (t).

Gcta: Emisiones de CO2 por pasada CAEX con tecnología TA (t).

Pg: Tarifa por emisión de CO2 estimada (USD/t).

Ecta: Electricidad consumida por pasada del equipo con tecnología TA (kWh).

Pe: Tarifa de electricidad promedio de la mina (USD/kWh).

- **Cálculo tiempo de ciclo caso base:** definir el tiempo de ciclo de la flota tradicional en base a los resultados de tiempos de viaje de simulación, considerando que el tiempo de ciclo se calculara como tiempo efectivo utilizando los indicadores entregados por plan. Desde la simulación se podrán obtener los tiempos de viaje de cada ruta, los cuales se agruparán para calcular un tiempo de viaje global ponderado por el tonelaje que mueve cada una.

$$TVP_{ij} = \sum_{j=2027}^{2050} \sum_{I=1}^n \frac{TV_{ij} * Ton_{ij}}{Ton Total_j} \quad (15)$$

En donde:

TVP_{ij}: es el tiempo de viaje ponderado por el tonelaje de acuerdo con el año “j” que toma valores entre 2027 al 2050.

TV_{ij}: tiempo de viaje cargado y descargado por ruta “i” que va desde valores de 1 a 23 como máximo, en el año “j”.

Ton_{ij}: tonelaje que mueve ruta por la ruta “i” en el año “j”.

- **Cálculo de tiempo de ciclo TA:** definir el tiempo de ciclo de la flota con la tecnología *Trolley Assist*, la cual modifica los tiempos de viaje solo en las rutas que pasa por las rampas adaptadas para la tecnología. Al igual que el cálculo de tiempo de ciclo de la flota tradicional, también se considerará el tiempo efectivo de los indicadores entregados por plan.

$$TVP_TA_{ij} = \sum_{j=2027}^{2050} \sum_{l=1}^n \frac{TV_TA_{ij} * Ton TA_{ij} + TV_STA_{ij} * Ton STA_{ij}}{Ton Total_j} \quad (16)$$

En donde:

TVP_TA_{ij}: es el tiempo de viaje ponderado por el tonelaje al incorporar la tecnología *Trolley Assist* de acuerdo con el año “j” que toma valores entre 2027 al 2050.

TV_TA_{ij}: tiempo de viaje cargado y descargado por ruta *trolley* “i” que va desde valores de 1 a 23 como máximo, en el año “j”.

TV_STA_{ij}: tiempo de viaje cargado y descargado por ruta no *trolley* “i” que va desde valores de 1 a 23 como máximo, en el año “j”.

Ton TA_{ij}: tonelaje que se mueve por la ruta “i” que pasa por rampa *trolley* en el año “j”.

Ton STA_{ij}: tonelaje que se mueve por la ruta “i” que no pasa por rampa *trolley* en el año “j”.

- **Productividad flota caso base:** determinar la productividad para la flota tradicional en base a la data del caso de estudio y los resultados de la simulación, conociendo los indicadores de la flota de transporte entregadas por plan, se puede conocer la cantidad de tonelaje por periodo que puede mover un CAEX.

$$Horas Efectivas Anuales(h) = 365 * 24 * \%Disp.* \%Util.Efectiva \quad (17)$$

Obteniendo las horas efectivas anuales por CAEX, es importante poder saber el rendimiento del equipo, el cual dependerá netamente del tiempo de ciclo de cada periodo y del payload, el rendimiento estaría dado según las vueltas que el equipo da en una hora al día.

$$Rendimiento Efectivo \left(\frac{t}{h} \right) * CAEX = \frac{Payload * 60}{Tciclo caso base} \quad (18)$$

Con los datos de rendimiento efectivo de equipos y las horas efectivas anuales que se consideran, se puede conocer la productividad anual por CAEX.

$$Productividad \left(\frac{t}{año} \right) * CAEX = Rendimiento Efectivo * Horas Efectivas Anuales \quad (19)$$

- **Productividad flota TA:** determinar la productividad de un equipo equipado con el sistema TA, se estimará considerando los mismos indicadores de horas efectivas que el caso tradicional. Se tomará el supuesto que la disponibilidad física y la utilización efectiva de la flota del caso base es igual para el caso de los equipos con retrofit. Los tiempos de ciclo son distintos cuando se incorpora el retrofit TA, también lo son los rendimientos de los equipos que se calcularán en esta sección.

$$Rendimiento Efectivo TA \left(\frac{t}{h} \right) * CAEX = \frac{Payload * 60}{Tciclo TA} \quad (20)$$

Con los datos de rendimiento efectivo de equipos con TA y las horas efectivas anuales que se consideran, se puede conocer la productividad anual por CAEX.

$$Productividad \left(\frac{t}{año} \right) * CAEX TA = Rendimiento Efectivo TA * Horas Efectivas Anuales \quad (21)$$

- **Dimensionamiento de flota tradicional:** calcular la cantidad de equipos de transporte de la flota del caso base, considerando la productividad anual o rendimiento por año del equipo de transporte utilizado en la mina, se podrá determinar conociendo la cantidad de tonelaje al año que se debe mover.
- **Selección cantidad de numero de pantógrafos:** determinar cantidad de pantógrafos que ofrezcan una utilización estratégica para el caso de la mina. Tratando de evitar la sobrestimación de estos para no tener periodos de tiempo sin uso y aprovecharlos durante el periodo que se recomienda.
- **Dimensionamiento de flota con TA:** calcular la cantidad de equipos de transporte de la flota incorporando los equipos con pantógrafo o retrofit, considerando la productividad anual o rendimiento por año del equipo de transporte TA, se determinará el cálculo total de equipos considerando la cantidad de tonelaje que se debe mover al año.

- **Ahorro de combustible:** calcular el consumo de combustible para los escenarios con la flota tradicional y para la flota incorporando la tecnología, con el objetivo de analizar las principales diferencias de consumo y a la vez de emisiones de CO2.

4.2 Metodología valorización económica

Dentro de la valorización económica se considerarán precios referenciales en el mercado actual. Es importante destacar que, dentro de los costos de inversión o CAPEX, se consideraran costos asociados a la línea eléctrica *trolley*, al retrofit aplicado a los equipos y subestación eléctrica en la mina. A continuación, se definirá que gastos se contemplaran en cada una de ellas.

- **Línea eléctrica *trolley*:** esta contempla el equipamiento completo de la línea eléctrica, el cual cuenta con los cableados y tensores, sus postes y fijaciones necesarias, además de agregarle los costos civiles y estructurales para su diseño, que dependerán netamente del largo de rampa. A medida que la rampa avance esta contemplara la extensión que se obtiene de año a año.
- **Retrofit CAEX:** dentro de las modificaciones que se le deben agregar al equipo de transporte este debe contar con el kit de pantógrafos que permiten la conexión eléctrica a la línea. Debe contar además con un gabinete eléctrico, específico para el modelo de camión en la mina. El costo del kit dependerá también de la demanda que vaya ocurriendo de año a año.

- **Subestación eléctrica:** esta cuenta con rectificadores de tensión que permiten alimentar de manera continua la vía eléctrica, los cuales deben contar con transformadores de corriente. El tablero de distribución para poder alimentar de manera eficiente el largo de la rampa. Además de una sala eléctrica y sus subsistemas interiores, el cual cuenta con una plataforma, cargador de baterías, un banco de baterías, entre otras cosas. La alimentación a la subestación para que esta pueda ser rectificadora debe considerar el trasado de línea de transmisión de la subestación principal, el cual dependerá de la distancia que se encuentra con respecto a la instalación a un costado de la rampa.
- **Reubicación:** con la intención de reutilizar la infraestructura eléctrica ya instalada en el botadero norte, se considera un costo por reinstalar hacia el nuevo sector que es más económico que volver a invertir en una subestación. Estos costos contemplan costos civiles, movimiento e instalación eléctrica y postación.

Por otro lado, los aportes económicos estarán dados por la cantidad de pasadas y equipos con retrofit. El aporte o beneficio económico total dependerá de estos parámetros considerando el aporte por pasada de cada rampa disponible de acuerdo con el año.

$$Aporte\ Total\ (MUSD) = \#CAEX\ TA * APP * \#Vueltas\ por\ CAEX \quad (22)$$

Este análisis incorporará una iteración del Valor Actual Neto del ejercicio económico iterando la cantidad de CAEX con retrofit, esto para poder dimensionar hasta qué cantidad de equipos adaptados se puede conseguir un beneficio económico.

5 Caso de estudio

Para efectos de este estudio se realiza la consideración de diferentes factores importantes para llegar a los resultados esperados los cuales se muestran a continuación:

- 1) **Plan de producción:** Dentro del plan de producción, en la Figura 14 se muestra el movimiento de material de la mina durante toda la vida útil desde el año 2026 hasta su fin en el año 2050, distinguiendo los distintos destinos que se encuentran en la mina, entre ellos los stocks de baja ley, el chancado, material a botadero, entre otros stocks que se forman.

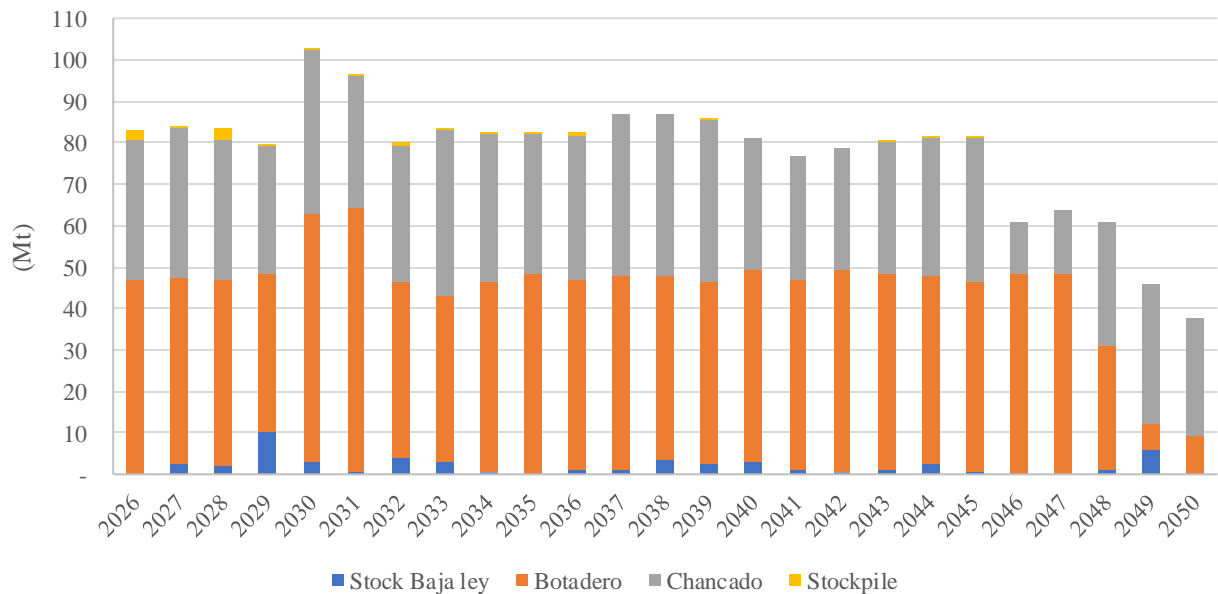


Figura 14: Plan de producción mina.

Con esto cabe resaltar que la mayor cantidad de material va asignado a los destinos de chancado y botadero, teniendo una predominancia importante de material. Al evaluar la mina, este cuenta con un chancador ubicado estratégicamente accesible a la salida de la mina, por lo que no cuenta con ninguna pendiente atractiva para poder evaluar la tecnología *Trolley Assist*.

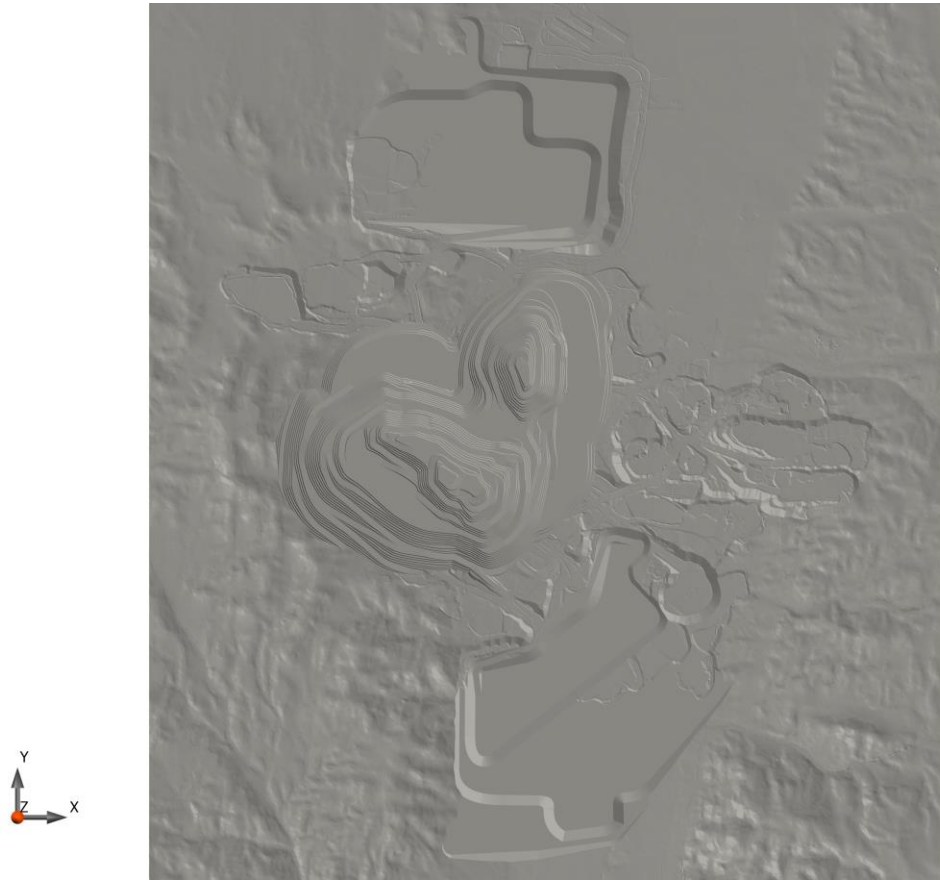


Figura 15: Topografía de mina 2030.

La flota de transporte considerada para la mina será del modelo KOM930-E5, el cual cuenta con un payload de 295 (t). Para determinar las horas efectivas que estén trabajando por año los equipos de transporte es importante también poder manejar su disponibilidad y utilización estimada por parte del plan minero, datos cuya utilización será considerada como efectiva para el posterior cálculo de flota de camiones.

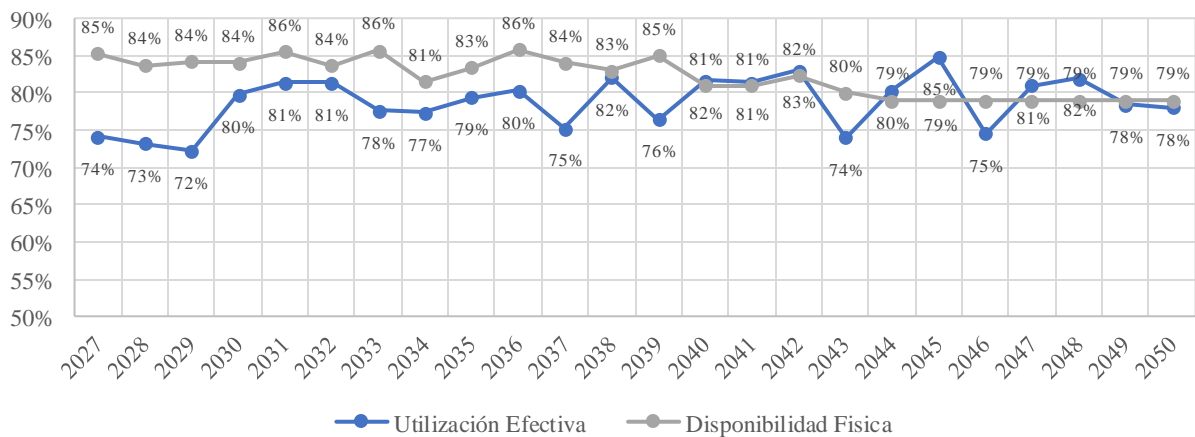


Figura 16: Disponibilidad física y utilización efectiva.

2) **Consumo de fuentes energéticas para el simulador:** para considerar los consumos de las fuentes energéticas como lo son el diesel y la electricidad, estos se basarán en curvas que se le cargan al simulador, como se muestra en el Figura 17, esta curva de consumo de diesel dependerá de cuanto sea la carga a la que este siendo sometida el motor, el cual para este caso su máximo es de 494 (l/h).

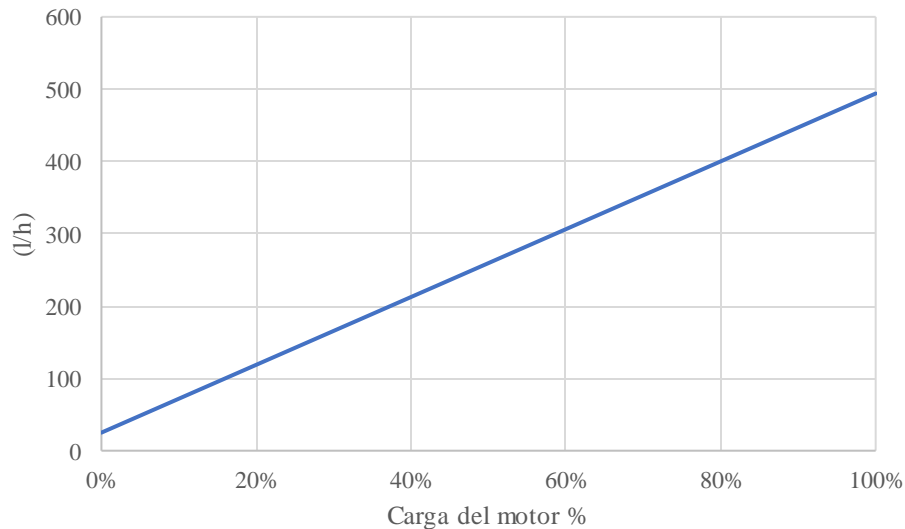


Figura 17: Grafico de consumo de combustible.

Algo similar pasa con el consumo eléctrico, en donde se indica la potencia requerida del equipo dependiendo de un factor de carga. En la Figura 18 se muestran las potencias de acuerdo con el factor de carga del motor.

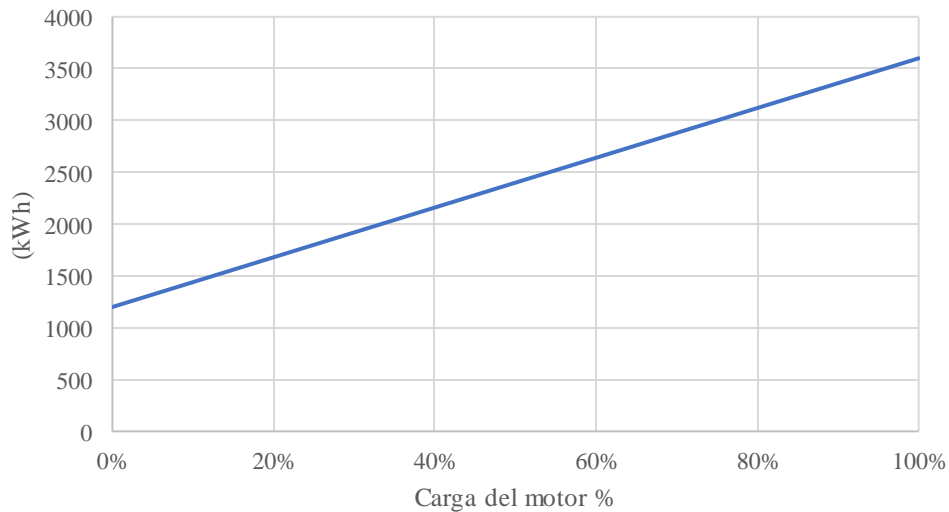


Figura 18: Grafico de consumo de electricidad TA.

- 3) **Límites de velocidad en el simulador:** importante establecer los límites de velocidades máximas de los equipos en diferentes condiciones operativas, cuando está subiendo una cuesta o tiene que realizar giros en 180°. En la Tabla 2 se pueden capturar las velocidades con respecto a los ángulos de giro, y de cuál es el límite de velocidad máxima en que esta se puede tomar.

Tabla 2: Velocidades máximas de giro.

Límites de velocidad máx. en curva		
Cargado	(0°; 10°) Desviación	60 (km/h)
	(10°; 20°) Desviación	50 (km/h)
	(20°; 30°) Desviación	40 (km/h)
	(30°; 40°) Desviación	28 (km/h)
	(40°; 50°) Desviación	27 (km/h)
	(50°; 60°) Desviación	25 (km/h)
	(60°; 180°) Desviación	20 (km/h)
Descargado	(0°; 10°) Desviación	60 (km/h)
	(10°; 20°) Desviación	50 (km/h)
	(20°; 30°) Desviación	40 (km/h)
	(30°; 40°) Desviación	28 (km/h)
	(40°; 50°) Desviación	27 (km/h)
	(50°; 60°) Desviación	25 (km/h)
	(60°; 180°) Desviación	20 (km/h)

En la Tabla 3 muestra las velocidades máximas en pendiente, para los equipos cuando se encuentran cargados y sin material.

Tabla 3: Velocidades máximas en pendiente.

Límites de velocidad máx. en pendiente		
Cargado	(-∞%; -5,5%)	26 (km/h)
	(-5,5%; 5,5%)	32 (km/h)
	(5,5%; ∞%)	25 (km/h)
Descargado	(-∞%; -5,5%)	30 (km/h)
	(-5,5%; 5,5%)	40 (km/h)
	(5,5%; ∞%)	25 (km/h)

- 4) **Tiempos de maniobras:** para establecer correctamente los tiempos de ciclo efectivo, se considerarán como tiempos de maniobra los que se muestran en la Tabla 4, los cuales generan un tiempo de carga, descarga y aculatamientos totales de 6 (min).

Tabla 4: Valores de tiempos de maniobras.

Tiempos de maniobras	
Tiempo de carguío	3 (min)
Tiempo de descarga	1,5 (min)
Tiempo de aculatamiento para carguío	0,75 (min)
Tiempo de aculatamiento para descarga	0,75 (min)
TOTAL	6 (min)

- 5) **Costos de inversión para tecnología TA:** las consideraciones en los costos de inversión una vez definido los mejores escenarios para la tecnología, se utilizarán los precios referenciales mostrados en la Tabla 5.

Tabla 5: Costos de inversión por unidad.

CAPEX	Requerimientos	Costo unitario (USD)
Línea eléctrica <i>trolley</i>	Equipamiento línea eléctrica, costos civiles y estructurales	4 300 (USD/m)
Retrofit CAEX	Kit de pantógrafo + Gabinete eléctrico KOM 930-E5 + Seguro y gastos de internación	1 094 350 (USD/CAEX)
Subestación eléctrica	Subestación eléctrica, rectificadores, transformadores y tablero de distribución	4 098 000 (USD)
Reinstalación de <i>trolley</i>	Reubicación de infraestructura y línea eléctrica	2 049 000 (USD)

- 6) **Costo de equipo de transporte:** es importante poder considerar el precio o costo de un equipo KOM930-E5, ya que puede ser relevante si en el ejercicio, existe la posibilidad de disminuir la flota de transporte.

Tabla 6: Costo de equipo de transporte KOM930-E5.

Equipo de transporte	Precio (USD)
KOM930-E5	6 300 000

6 Resultados

Los resultados mostrados se basan principalmente de la información simulada de rutas de transporte dentro de una mina, con el objetivo de encontrar un escenario favorable para solo una rampa en simultaneo y llevarlo al ejercicio económico.

6.1 Desarrollo técnico

6.1.1 Resultados de simulación

Dentro de las topografías y la configuración de las rutas planificadas dentro de la mina se seleccionarán perfiles de transporte para poder realizar una evaluación técnica de cada uno. Para las principales características de evaluación y consideraciones para evaluar, se debe tomar en cuenta:

- a) Replicar el plan minero considerando el tiempo de transporte desde el baricentro de cada banco a su destino.
- b) Se evaluarán perfiles de transporte de material en la zona expit, específicamente en los destinos de botadero.
- c) El movimiento de material a botadero será según lo establecido en el plan minero.
- d) Se considera el tiempo de construcción de la extensión de cada perfil evaluado.
- e) La elección de perfiles se realizará para rampas con las menores curvaturas posibles.

En base a las topografías se dibujaron las rutas correspondientes a todos los años de la mina, desde el origen de distintas fases, a los destinos de botadero y chancado. Las rutas se dibujan por sobre las topografías entregadas, estas son las imágenes de la mina a fin de cada periodo, por lo que el avance del pit y el botadero va creciendo anualmente (ver Figura 19).

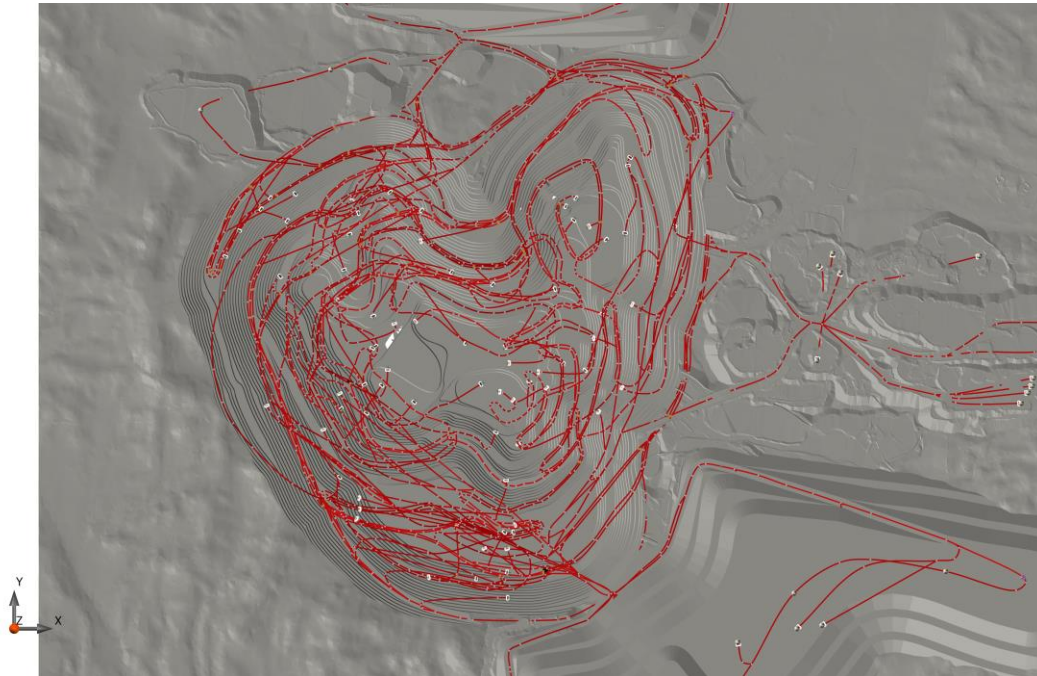


Figura 19: Rutas dibujadas sobre topografías.

Cada una de las rutas dibujadas se utilizan mediante uno las habilite o no para ese periodo. Marcando nodos de salida de cada fase en su año correspondiente, toman las rutas de transporte hacia los destinos establecidos por plan.

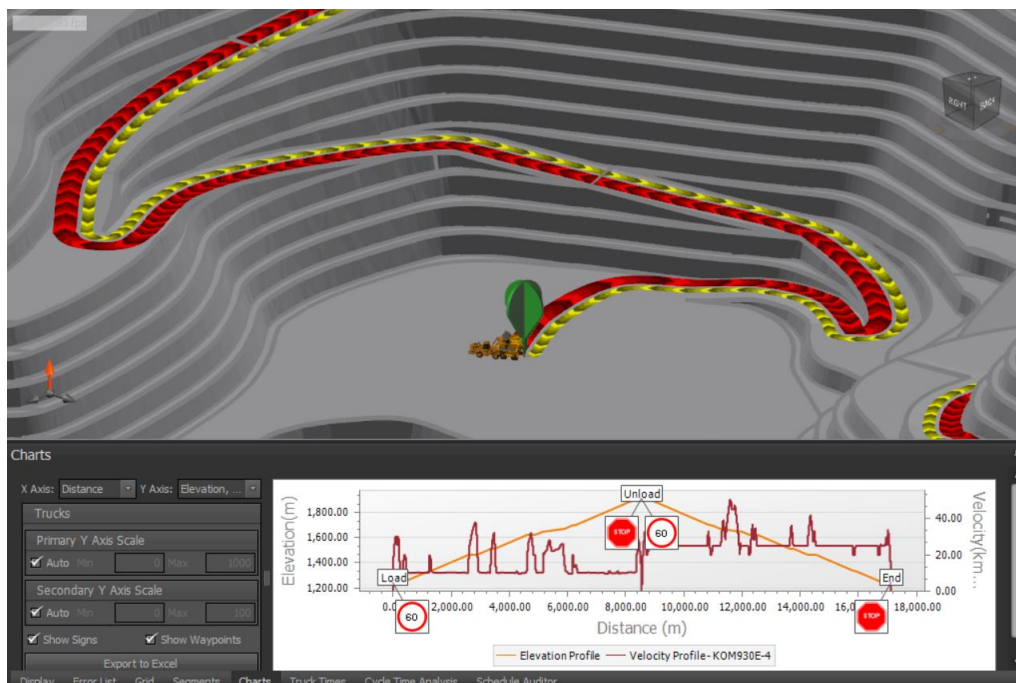


Figura 20: Simulación origen destino caso de estudio.

Tomando los resultados del modelo proveniente de la simulación, esta nos entrega resultados considerando la flota del caso base como también la flota con *Trolley Assist* entregando resultados tales como:

- Tiempos de viaje.
- Consumos de combustible.
- Consumo de electricidad.
- Velocidades por perfiles.
- Largos de rutas.
- Pendientes de cada tramo.

Los resultados de las simulaciones entregan cada información en los viajes de ida y vuelta de cada una de las rutas, los consumos de combustible que tienen en cada trayecto y electricidad en caso de ser *trolley*. Además de entregar las velocidades de cada ruta dibujada en el simulador.

6.1.2 Análisis por pasada

Dentro de todas las rutas dibujadas, la búsqueda de rampa candidata será en perfiles de transporte expit, de las cuales surgirán candidatas en las rutas a botadero debido a las pendientes subiendo cargado de los camiones y el alcance de este estudio. La mina cuenta con dos botaderos, uno ubicado al norte del rajo, y otro ubicado al sur este del mismo. Su distribución de tonelaje se presenta en el Figura 21, donde se muestra la distribución de material de cada botadero.

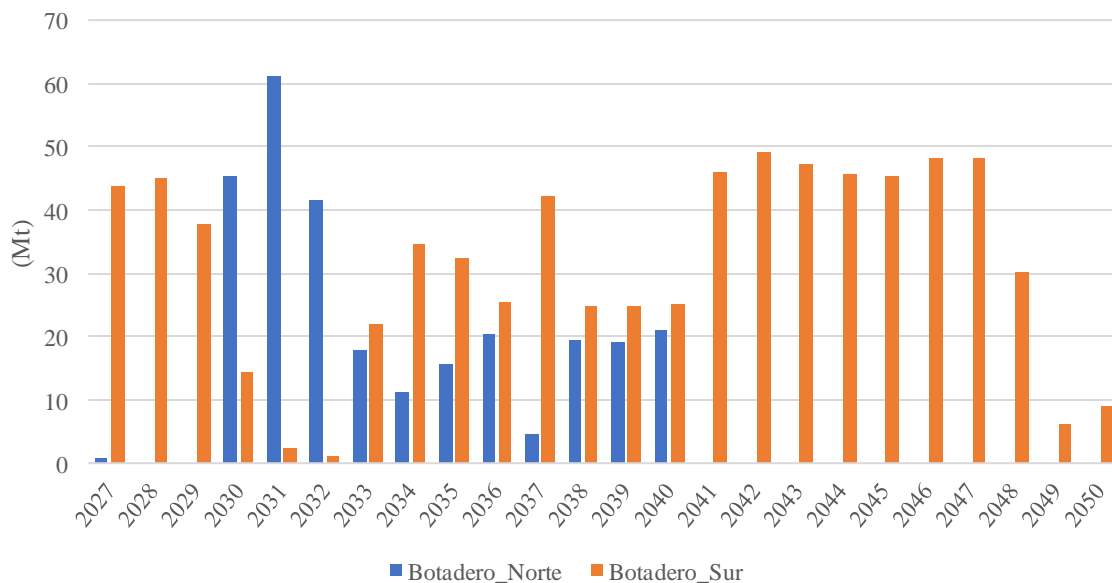


Figura 21: Movimiento de material a botaderos.

A partir del gráfico anterior se puede notar que la cantidad donde se mueve mayor cantidad en la mina es en el botadero sur, el cual cuenta con una capacidad total de 766 (Mt) aproximadamente, mientras que el botadero norte cuenta con una capacidad de 310 (Mt) de estéril, siendo incluso casi la mitad de la capacidad del primero.

Para ver los beneficios que entregan las rampas de transporte de la mina, se debe realizar un análisis por pasada, el cual se captura realizando una simulación determinística solo en la zona de interés o rampa candidata. Con el análisis por pasada se pueden comparar los distintos valores de consumo de combustible, consumo eléctrico, tiempo en la rampa y las velocidades con la que pasan. Este ejercicio se realiza tanto para el equipo sin y con *Trolley Assist*, para poder rescatar los ahorros o beneficios que brinda al implementarse.

Los factores como la longitud de las rutas, la inclinación del terreno, el ancho de rampa y la carga son los aspectos que destacan la utilidad de esta tecnología. Es esencial considerarlos al implementarla y poder apuntar a su futura operación en el tajo. Estas recomendaciones se detallan en la Tabla 7, donde se presenta cada variable para evaluar la tecnología.

Tabla 7: Recomendaciones al evaluar implementación de *Trolley Assist*.

Parámetro	Medida
Largo	> 600 (m)
Pendiente	>6 %
Temporalidad	>6 años
Tonelaje	> 50 (Mt)

Las rampas candidatas se considerarán con pendientes sobre el 6%, con largos atractivos sobre los 600 (m) para que pueda generarse el beneficio de aumento de velocidad en la rampa. También el perfil de transporte debe poseer un alto movimiento de material por sobre las 50 (Mt) y que tenga una duración superior a los 5 años circulando material, esto con el objetivo de que se pueda pagar la inversión de la tecnología. La cantidad de material es importante porque nos indica el flujo de equipos que estarán pasando por el sector, mientras mayor movimiento, mayor requerimiento de equipos TA se requerirán.

Las rampas en los botaderos o en el sector expit que es donde se van a evaluar, se analizaron aplicando los criterios establecidos. Dentro de esta evaluación se encontraron cuatro posibles rampas, esto para poder comparar entre ellas sus beneficios al implementar el sistema. Se puede observar en la Figura 22 la ubicación espacial de donde se encuentra cada una de ellas en la mina.

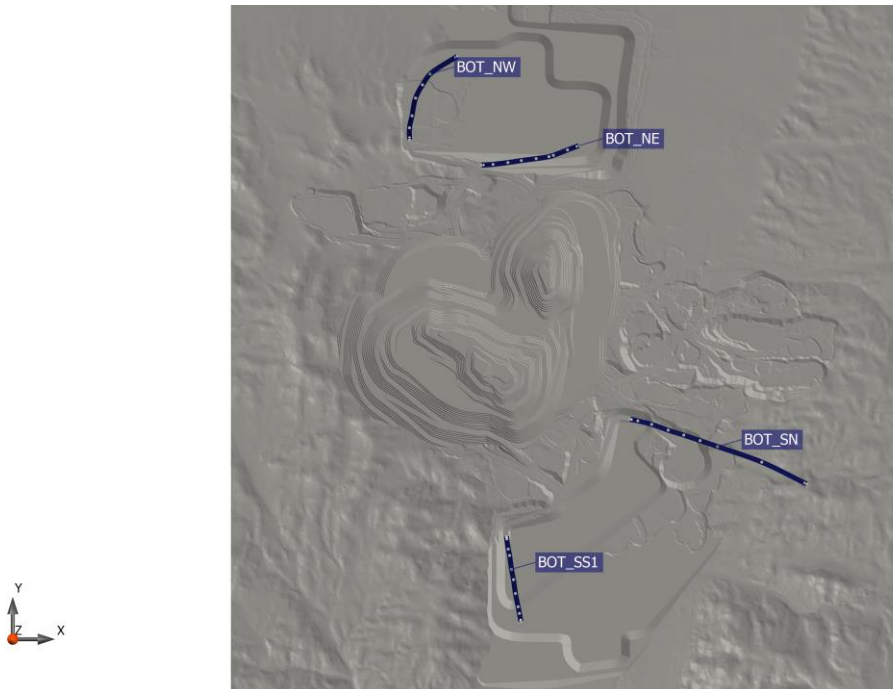


Figura 22: Rampas candidatas expit.

Los movimientos de material son importantes a la hora de evaluar una rampa, debido a la cantidad de pasadas que requiere y mayor movimiento de flota por este sector. El material que va dirigido a botadero es un total de 1 076 (Mt), en donde el botadero norte de la mina (Figura 23) mueve 310 (Mt) representando el 28,8% del movimiento total de lastre. Este botadero cuenta con dos perfiles que serán analizados; BOT_NW y BOT_NE.

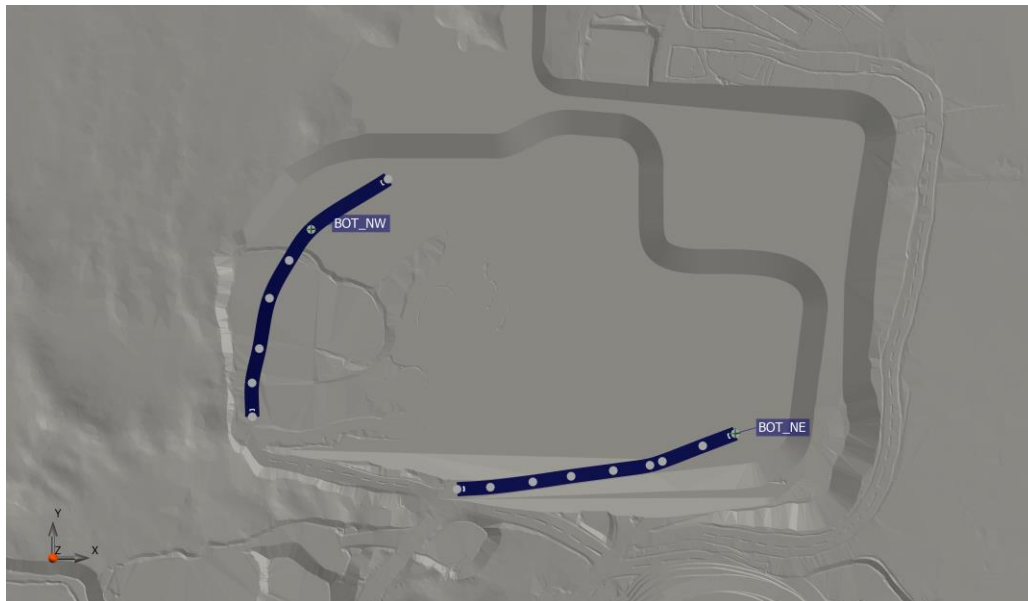


Figura 23: Rampas ubicadas en botadero norte.

Por otro lado, el otro 71,2% va dirigido al botadero sur, el cual cuenta con un movimiento aproximado de 766 (Mt), siendo este botadero el que cuenta con una mayor disposición de material de lastre. Las rutas analizadas en este botadero serán las que aparecen en la Figura 24, donde se encuentran dos perfiles; BOT_SN y BOT_SS1.

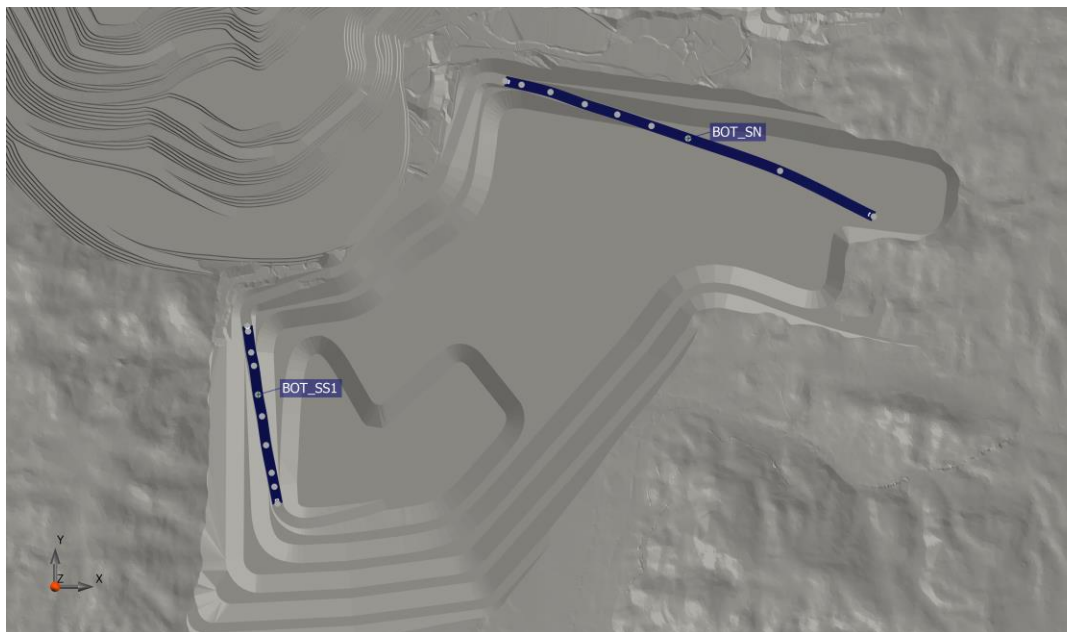


Figura 24: Rampas ubicadas en botadero sur.

En la Tabla 8 y Tabla 9 se plasman las características que tiene cada rampa en el sector del botadero norte y en el botadero sur respectivamente. Estas tablas muestran la longitud correspondiente en los años que se utiliza, la pendiente y el tonelaje que pasa por el sector. Es importante destacar que el material que se suma en cada rampa es todo el lastre que se puede mover en el periodo que está habilitada la rampa, tratando de maximizar el paso por los perfiles que se le incorpore la tecnología.

Tabla 8: Características rampas botadero norte.

Años	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040
BOT_NW			540 (m) / 8.4% / 86.5 (Mt)				788 (m) / 9.1% / 84.8 (Mt)				
BOT_NE	522 (m) / 9.4% / 106.6 (Mt)		768 (m) / 9.6% / 171.2 (Mt)								

Tabla 9: Características rampa botadero sur.

Años	2037	2038	2039	2040	2041	2042	2043	2044	2045	2046	2047	2048	2049	2050
BOT_SN				563 (m) / 10% 258.5 (Mt)					1 064 (m) / 10.3% 96,3 (Mt)		1 448 (m) / 10.6% 45,4 (Mt)			
BOT_SS1	599 (m) / 10% 259.2 (Mt)							662 (m) / 10% 232.7 (Mt)						

En cada rampa que se evalúa, se agrega el aporte de los diferentes largos que alcanza la rampa antes de poder construirse su extensión total, ocurriendo esto en las cuatro candidatas. Un ejemplo puntual es el caso de la rampa BOT_NW, la cual cuenta con una extensión atractiva de 788 (m) desde el año 2036, pero con anterioridad esta ya tiene una extensión menor a esa de 540 (m) la cual se puede comenzar a construir desde el 2032, brindando también un aporte, la cual también ayuda como prueba piloto o a adelantar las obras de infraestructura en la rampa.

En la Tabla 10 se muestran los resultados de realizar una simulación por pasada, diferencias en los aportes en disminución de combustible, como también la disminución de tiempo durante el trayecto de cada ruta. Estos valores corresponden al aporte de la extensión completa de la ruta, ósea el máximo aporte que puede llegar a generar cada una de estas.

Tabla 10: Valores de parámetros de simulación determinística de extensiones máximas.

Parámetros	BOT NW		BOT NE		BOT SN		BOT SS1	
	Normal	Trolley	Normal	Trolley	Normal	Trolley	Normal	Trolley
Tiempo en tramo (min)	4,0	2,0	4,1	2,0	8,7	4,3	3,7	1,8
Comb. Consumido (l)	33,2	0,9	33,9	0,7	71,7	1,8	30,2	0,8
Electricidad Consumida (kWh)	0	119,2	0	121,4	0	255,9	0	108,3
Velocidad promedio en tramo (km/h)	15,6	26,7	12,4	23,3	12,0	22,2	13,1	23,2

Para comparar las rutas candidatas y los diferentes aportes que realizan, se analizaran los aportes de cada extensión. En la Figura 25 se puede observar el beneficio de velocidad por cada una de las rampas previamente escogidas, reflejando además el ahorro en tiempo por cada pasada.

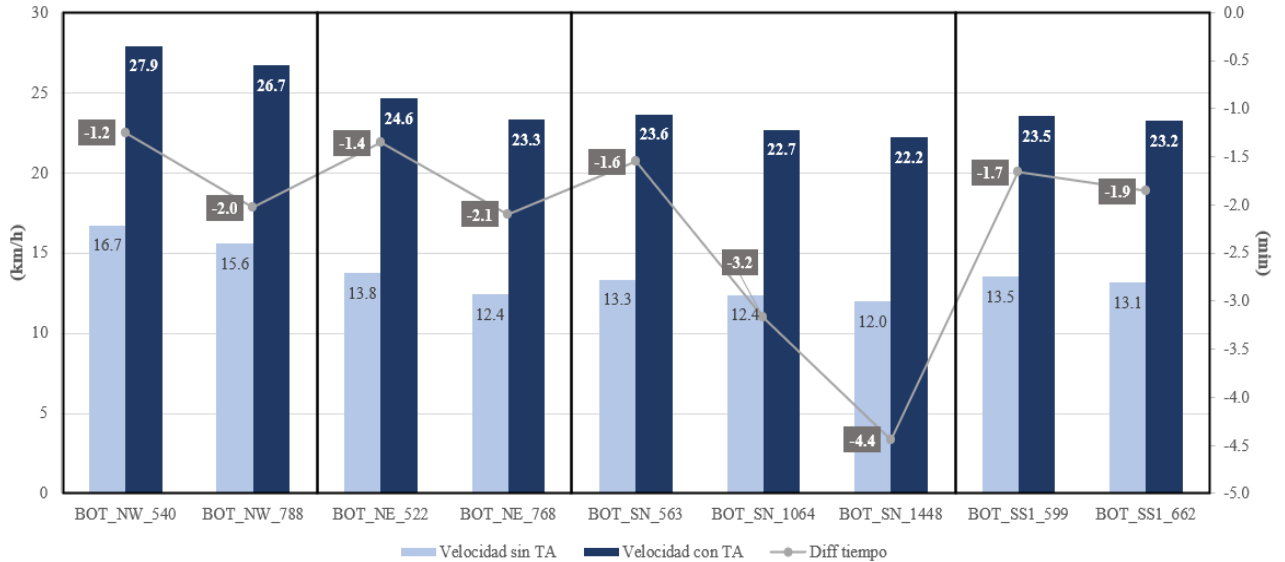


Figura 25: Velocidades de tramos con y sin TA.

Los camiones en la simulación suelen entrar a una velocidad 30 (km/h) en algunos casos, hasta que en un momento se estabiliza y logra alcanzar velocidades mayores con la tecnología. El promedio de velocidad en la rampa sin tecnología para todas las rampas es de 13,7 (km/h), mientras que con *trolley*, los CAEX alcanzan una velocidad de 24,2 (km/h) aproximadamente.

Otro aporte que se rescata es el ahorro de combustible mientras se encuentra en la rampa, los camiones al estar conectados a la línea *trolley* igual generan un consumo de combustible, pero notablemente menor que a los esfuerzos normales, ya que el motor se encuentra en funcionamiento, pero en ralentí, esto ocurre mientras los motores de tracción se alimentan directamente de la línea eléctrica. En la Figura 26 se puede plasmar el ahorro de combustible de cada rampa y tramo, además del consumo eléctrico que requieren los motores para poder vencer los esfuerzos en las pendientes.

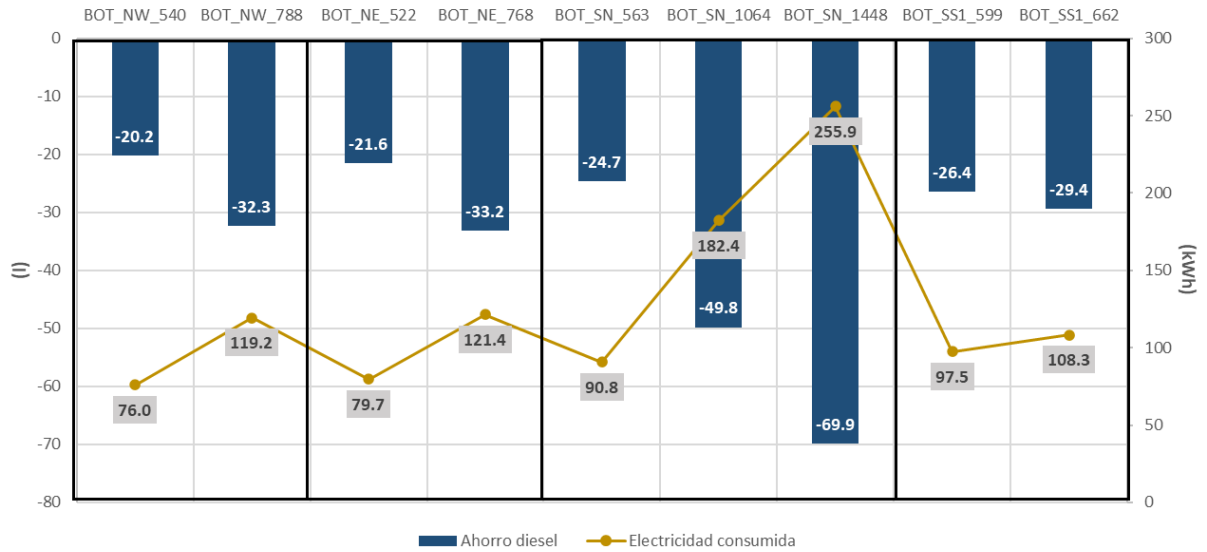


Figura 26: Ahorro de combustible y consumo de electricidad de cada tramo.

Por otro lado, los beneficios respecto a las emisiones de CO₂ se relaciona directamente con la disminución de quema de diésel, es decir que los litros de combustible quemado son proporcionales a la cantidad de kilogramos de CO₂ no emitidos. Utilizando un factor de 2,67 (kgCO₂/L) de acuerdo con datos de (COCHILCO, 2022) se escala el ahorro de gases contaminantes que ayudan a disminuir cada tramo por pasada como se muestran en el Figura 27.

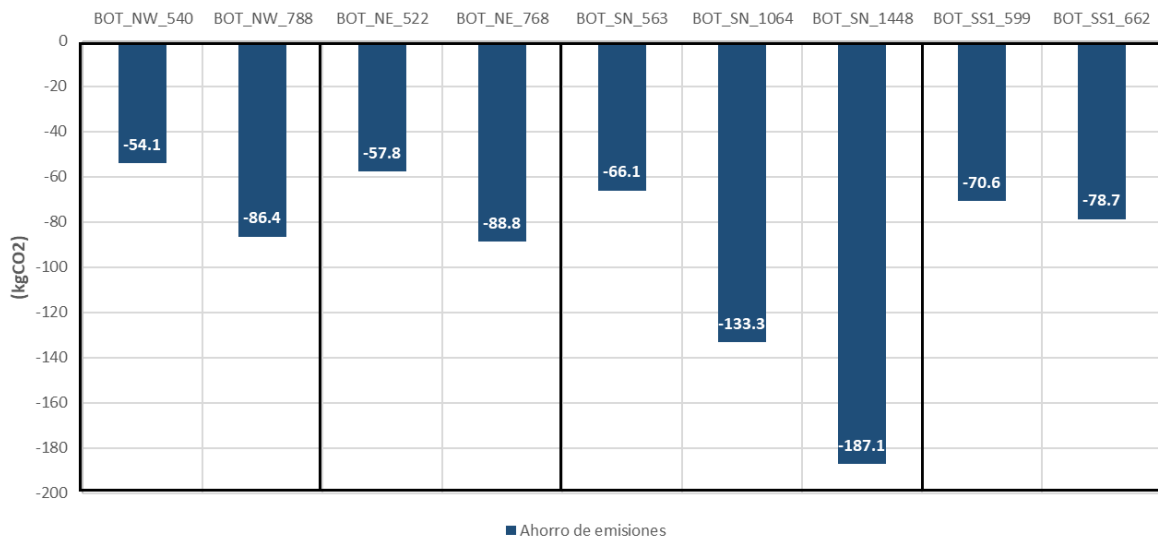


Figura 27: Ahorro de emisiones en cada tramo.

Observando el ahorro de emisiones de cada tramo y comparándolo con el consumo de la flota tradicional, el porcentaje de ahorro de todas las pasadas rodea entre un 97% a 98%. Esto debido a que la línea *trolley* al estar conectada a la red eléctrica solo considera un consumo de combustible en estado ralentí.

Teniendo toda la data técnica y el aporte de cada uno de los tramos de las rampas candidatas, se debe realizar un criterio para seleccionar la que generara el mayor aporte para la mina considerando el plan minero. Al ser una evaluación técnico-económica es importante saber cuánto es el aporte monetario que me genera la rampa por cada pasada, en donde la cantidad de tonelaje determina la cantidad de pasadas que generan los camiones por estos tramos.

Tabla 11. Tarifas promedio de parámetros.

Tarifas promedio	
Combustible (USD/l)	0,802
Electricidad (USD/kWh)	0,08
Crédito por CO2 (USD/t)	18,8

Utilizando la Ec.(14), esta entrega el aporte por cada vez que pasa el camión por la rampa. Se puede determinar cuál de todos los tramos genera el mayor beneficio, esto depende directamente de la cantidad de pasadas por esta misma, asique considerando el *payload* y la cantidad de material que pasa por cada una de ellas, es posible discriminar el potencial económico que tienen.

Tabla 12: Potencial aporte económico de rampa.

Tramo trolley	Aporte por pasada (USD)	Tonelaje (Mt)	# Pasadas	Aporte por tramo (kUSD)	Aporte por rampa (kUSD)
BOT_NW_1	11,1	86,4	293 120	3 265	8 435
BOT_NW_2	18,0	84,7	287 305	5 170	
BOT_NE_1	12,0	106,6	361 578	4 351	15 138
BOT_NE_2	18,6	171,2	580 425	10 788	
BOT_SN_1	13,8	258,4	876 128	12 081	27 200
BOT_SN_2	27,9	96,3	326 541	9 098	
BOT_SN_3	39,1	45,4	153 960	6 022	
BOT_SSI_1	14,7	259,2	878 683	12 923	25 856
BOT_SSI_2	16,4	232,7	788 803	12 934	

De acuerdo con la Tabla 8 y Tabla 9, las rampas de cada sector se ubican en temporalidades distintas, por ejemplo, en el sector norte las rampa BOT_NW se ubica desde el año 2032, mientras que la rampa BOT_NE se comienza a utilizar desde el año 2030. Mismo caso ocurre en el sector sur, donde la rampa BOT_SN comienza el año 2040 y la BOT_SSI comienza el 2037.

Al considerar una rampa por cada sector y aprovechar el máximo tonelaje por la ruta se elegirá la que entregue el mayor potencial de aporte económico, basándose en los resultados obtenidos en la Tabla 12, dejando como candidata para el botadero norte la BOT_NE con un aporte económico potencial de 15,1 (MUSD) y para el botadero sur la BOT_SN, con un aporte económico de 27,2 (MUSD).

Para considerar que solo se utilizara una subestación para el año 2040, ambas rampas no pueden estar funcionando al mismo tiempo, ya que requieren una reubicación de infraestructura eléctrica, por lo que se considerara la rampa que genere un mayor beneficio, similar al ejercicio de aporte por pasada considerando los tonelajes que pasan ese año. Para la rampa BOT_NE el aporte es de 1,32 (MUSD) mientras que la rampa BOT_SN es 1,17 (MUSD). El escenario completo se muestra en la Tabla 13 y la Tabla 14, donde muestran la temporalidad que tendrá cada rampa y los diferentes largos en los periodos de la mina.

Tabla 13: Rampa BOT_NE para evaluación económica.

Años	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040
BOT_NE	522 (m) / 9,4% / 106,6 (Mt)		768 (m) / 9,6% / 171,2 (Mt)								

Tabla 14: Rampa BOT_SN para evaluación económica.

Años	2041	2042	2043	2044	2045	2046	2047	2048	2049	2050
BOT_SN	563 (m) / 10% / 233,4 (Mt)					1 064 (m) / 10,3% / 96,3 (Mt)		1 448 (m) / 10,6% / 45,4 (Mt)		

Dicha evaluación en el año 2040 y el cambio del BOT_SN sigue siendo mejor que la rampa BOT_SS1 debido a que no se considera el aporte de ese año. Considerando ambas rampas elegidas y encontrándose en una temporalidad continua desde el año 2030 hasta el fin de la mina, es posible reutilizar la infraestructura eléctrica cuando se comience la construcción de la rampa BOT_SN.

6.1.3 Cálculo de tiempo de ciclo caso base

Obteniendo los resultados de los orígenes y destinos del año 2027 hasta el 2050, el simulador entrega valores de tiempos de viaje cargado y descargado, a los diferentes destinos de la mina como lo son el chancado, los acopios de alta, acopios de baja ley y los destinos a botadero.

Con la ayuda de la Ec.(15) es posible determinar los tiempos de viaje ponderados por el tonelaje. Un resumen de los tiempos de viaje se muestra en la Figura 28, donde cada tiempo considerado de las rutas se pondero por el tonelaje que esta mueve, esto con la misión de entregarle mayor valor a las rutas que mueven más tonelaje dentro de la mina.

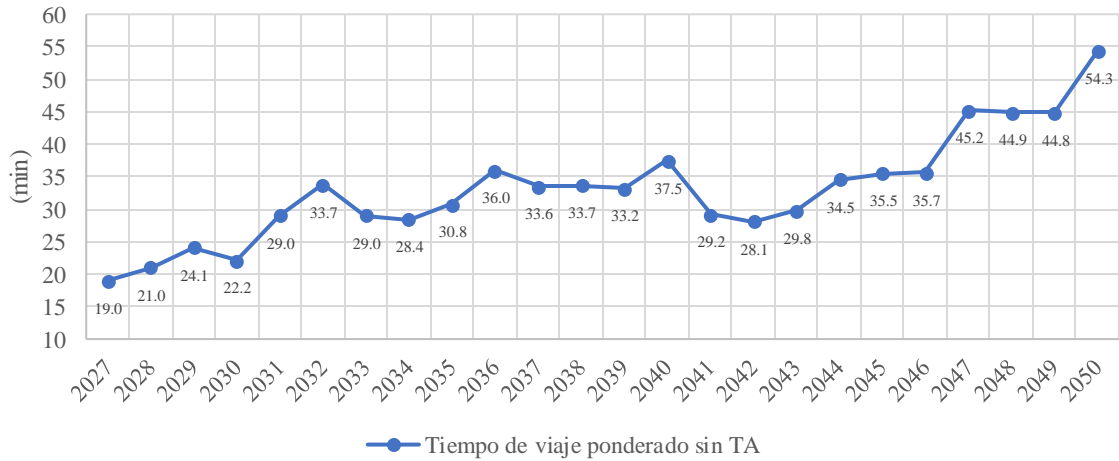


Figura 28: Resultado de tiempos de viaje por año flota tradicional.

Ya contando con los tiempos de viaje de cada una de las rutas y destinos, el tiempo efectivo que se utilizará para el cálculo de flota estará determinado por la Ec.(9), el cual considera un tiempo de maniobras que es 6 (min) (Tabla 4).

Una vez considerado los tiempos de maniobras de los equipos de transporte en la mina, se obtienen los tiempos de ciclo efectivo de cada una de las rutas de origen y destino. Teniendo estos resultados, se obtiene el tiempo de ciclo anual de cada una, para luego poder comparar el resultado al incorporar la tecnología. Estos tiempos se pueden observar en la Figura 29.

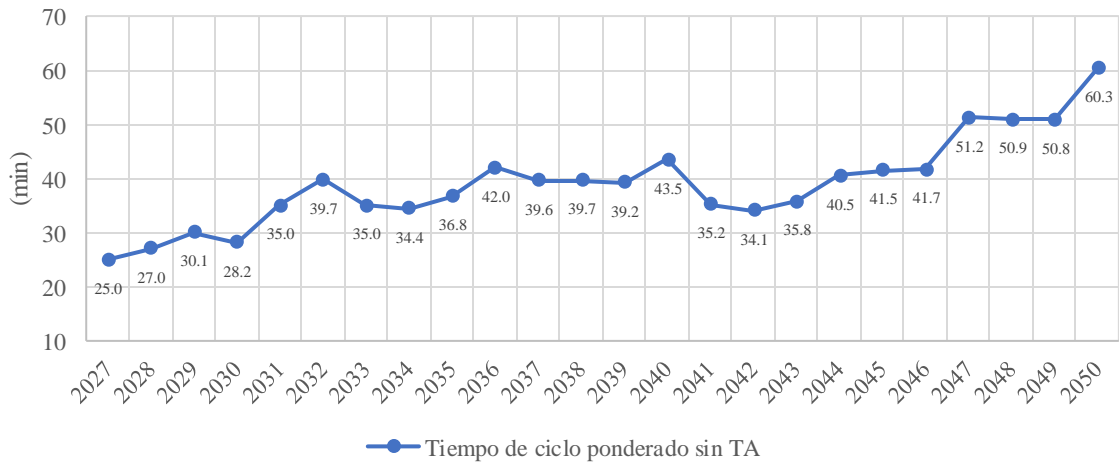


Figura 29: Resultado de tiempos de ciclo anual para flota tradicional.

6.1.4 Cálculo de tiempo de ciclo con TA

Para el cálculo de los tiempos de ciclo con la flota TA es similar al paso anterior, pero para este caso se considerará la condición operativa del *Trolley Assist*, donde en ciertos tramos los camiones pasaran a una velocidad mayor a la normal, por lo que es importante utilizar la Ec.(16) para determinar el tiempo de viaje ponderado anual de la mina con los equipos TA. En la Figura 30 se muestran los resultados de los tiempos de viaje ponderados con el tonelaje con la tecnología *Trolley Assist*.

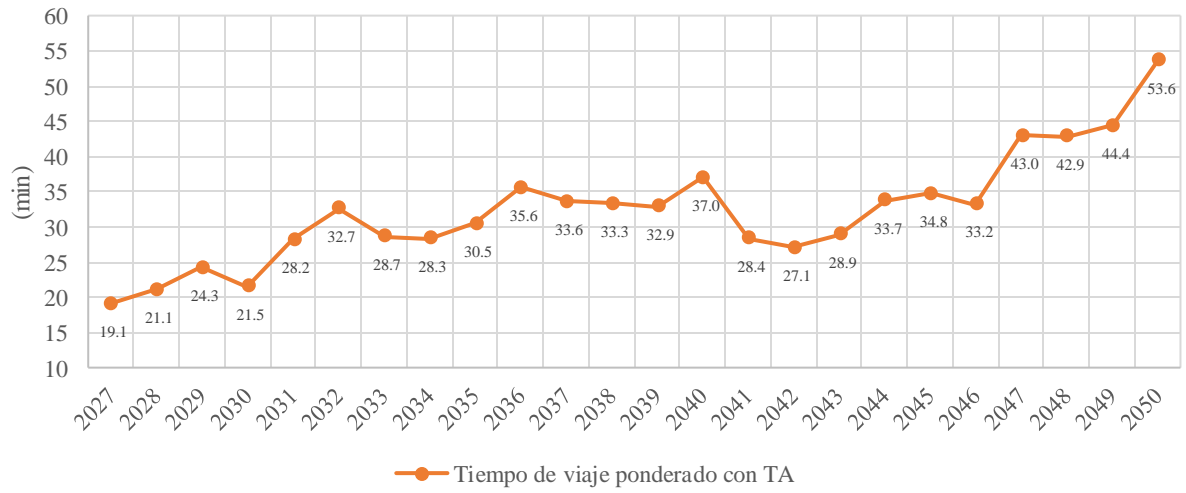


Figura 30: Resultado de tiempos de viaje anual con flota TA.

Incorporando los tiempos de maniobras asignados en la Tabla 4, el tiempo de ciclo de todas las rutas ponderadas por el tonelaje quedan de la siguiente manera como se muestra en la Figura 31.

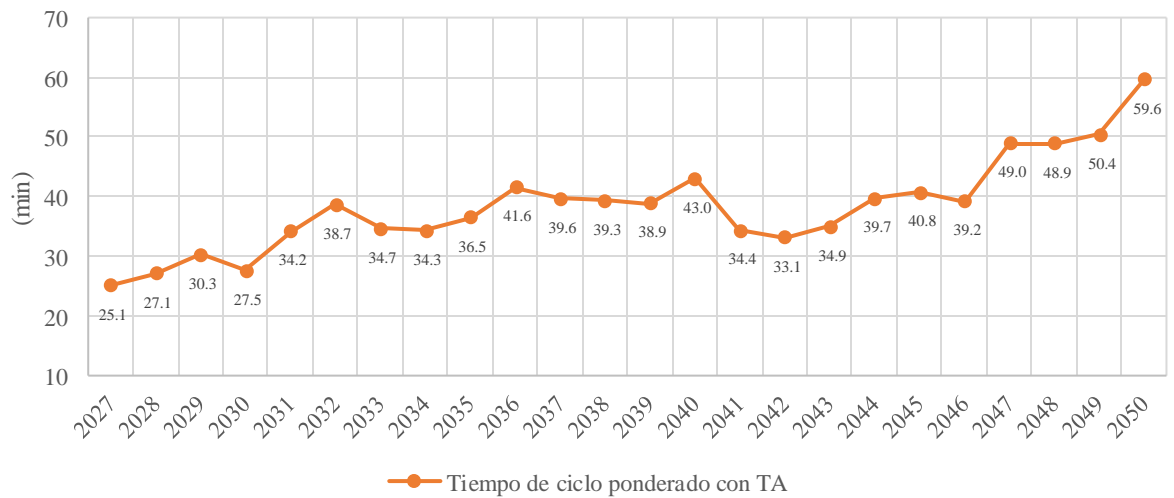


Figura 31: Resultado de tiempos de ciclo anual con flota TA.

6.1.5 Productividad de flota caso base

Luego de obtener los tiempos de ciclo anual, los cuales fueron ponderados por el movimiento de tonelaje de cada una de las rutas, se va a estimar y calcular la productividad de la flota de transporte tradicional. Considerando que los tiempos de ciclo estimados son efectivos (que consideran el tiempo de viaje y maniobras), las horas efectivas estarán dadas por la disponibilidad física de los equipos y la utilización efectiva en base a dicha disponibilidad establecida por plan.

Considerando la Ec.(17) y los indicadores entregados por plan, las horas efectivas anuales con las que cuenta el plan de minado son las que aparecen en la Figura 32.

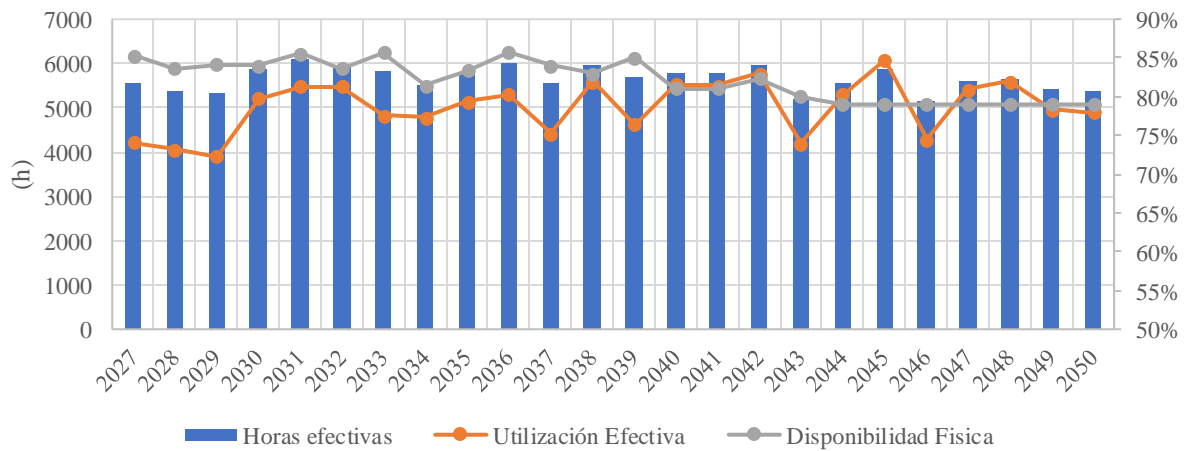


Figura 32: Horas efectivas anuales de equipos de transporte por plan.

Obteniendo las horas efectivas se puede realizar por otro lado el cálculo de rendimientos de los equipos de transporte con la Ec.(18), los resultados calculados quedan plasmados en la Figura 33.

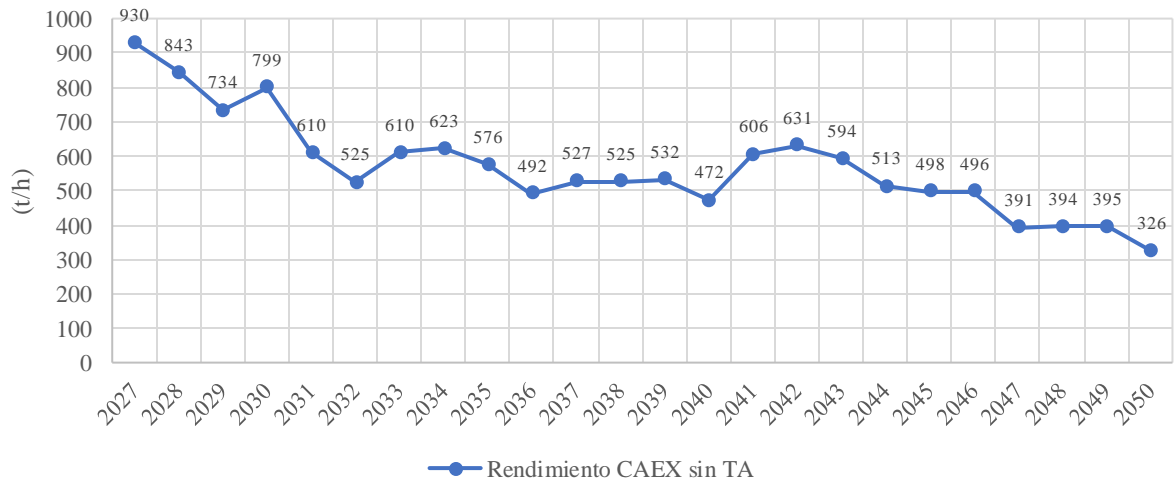


Figura 33: Rendimiento de flota tradicional.

Los datos de productividad por camión de cada periodo se muestran en la Figura 34 utilizando la Ec.(19), la cual considera los rendimientos de la flota y las horas efectivas calculadas.

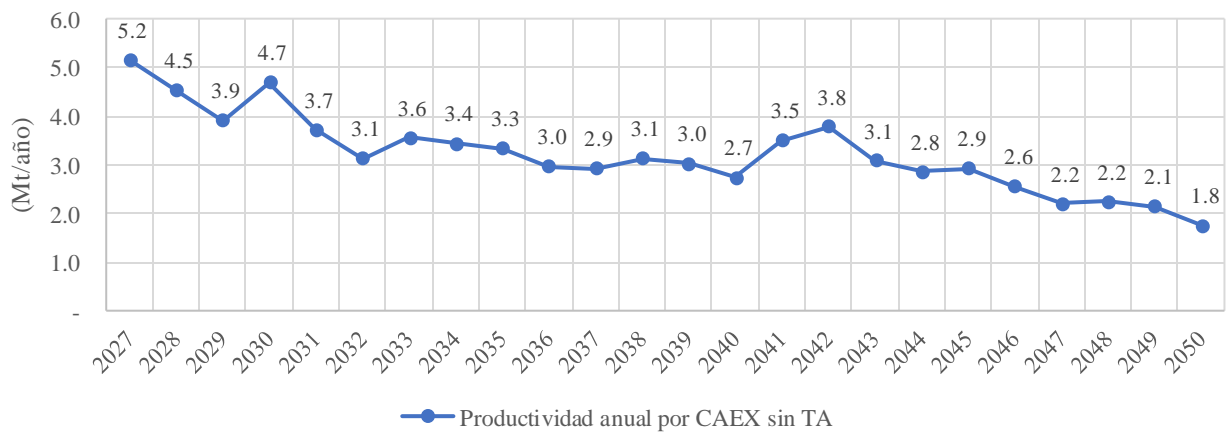


Figura 34: Productividad anual de CAEX tradicional

6.1.6 Productividad de flota TA

Utilizando las mismas consideraciones para el cálculo de productividad de flota caso base, con la única diferencia que la condición operativa para este cálculo será con el equipo de transporte de *Trolley Assist*. Tomando los resultados de tiempos de ciclo con TA, se va a estimar y calcular la productividad que el equipo brinda a los orígenes y destinos de las minas. Considerando que todos los equipos de transporte estén equipados. Los tiempos de ciclo calculados son efectivos, por lo que tienen en consideración el tiempo de viaje y las maniobras.

El rendimiento de los equipos con la tecnología se calculan utilizando la Ec.(20). Se muestra en la Figura 35 que estos resultados muestran un aumento en los periodos en que están habilitados los perfiles con las postaciones eléctricas o la activación de las rampas candidatas.



Figura 35: Rendimiento anual de CAEX TA.

Al combinar los rendimientos de estos equipos con las horas efectivas que son utilizadas durante el periodo, se puede conocer la productividad anual utilizando la Ecu. 21. En la Figura 36 se muestran los resultados.

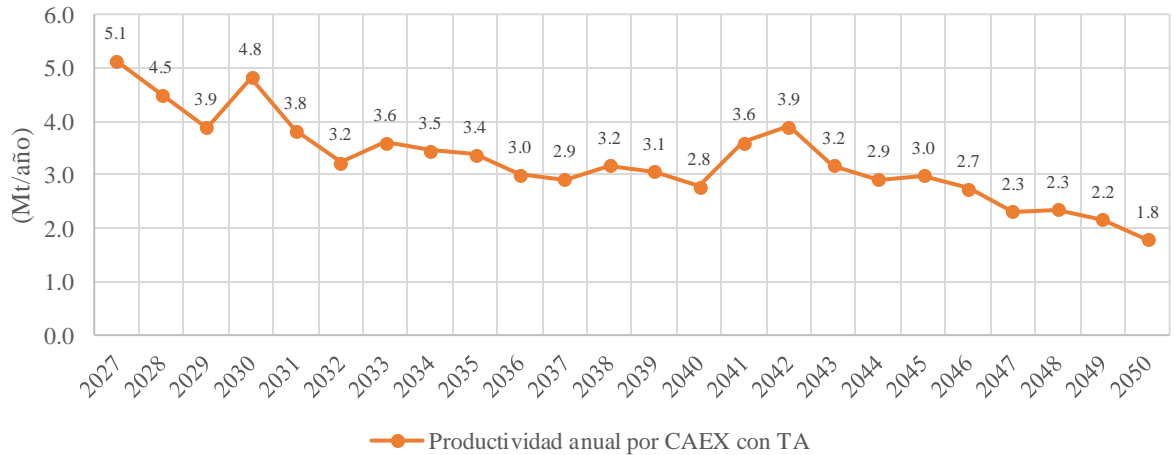


Figura 36: Productividad anual de CAEX TA.

6.1.7 Dimensionamiento de flota caso base

Para el cálculo de flota del caso base, considerando la Ec.(13), y la productividad del equipo de la flota tradicional se obtienen los resultados que requiere la mina. En la Figura 37 se muestran los resultados de cálculo de equipos con respecto a los movimientos entregados por plan.

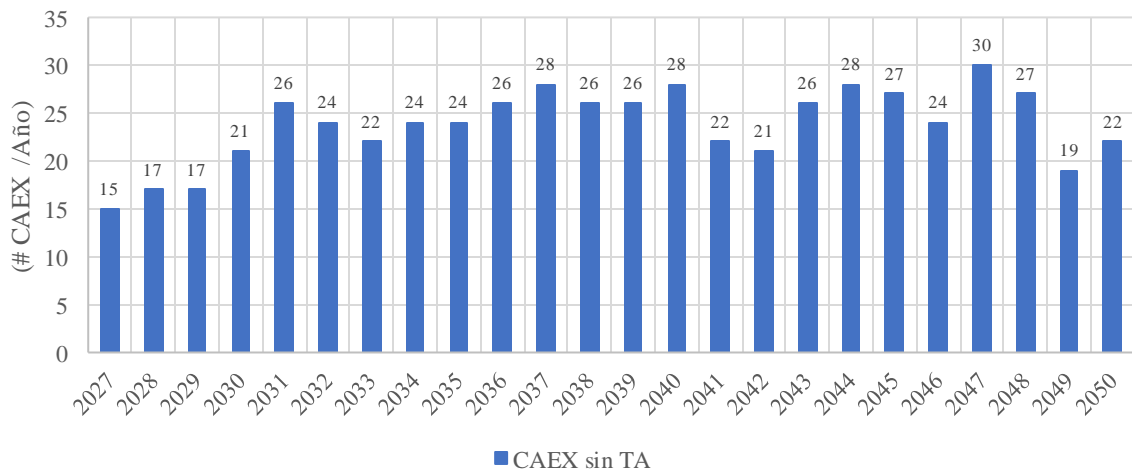


Figura 37: Calculo de CAEX caso base.

Al obtener dichos resultados es importante poder ajustar los indicadores de los equipos, esto con la misión de no sobre estimar flota y lograr una buena utilización de la flota de transporte. Luego para sensibilizar la flota y adaptar los indicadores entregados por plan para suavizar el vector de equipos requeridos para la mina, estos quedan reflejados la Figura 38.

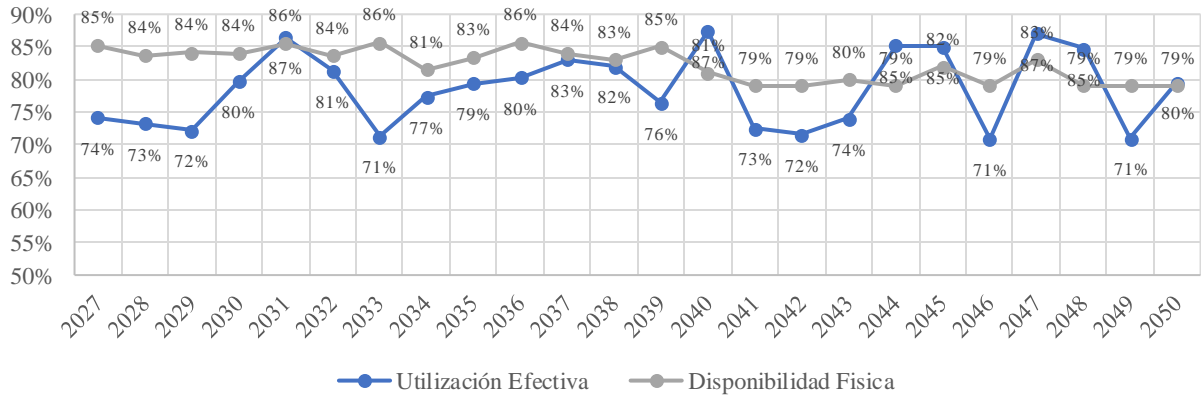


Figura 38: Disponibilidad física y utilización efectiva ajustada.

Ajustando estos indicadores de desempeño se incorpora el cálculo de CAEX tradicionales que se muestran en la Figura 39. Cada calculo se redondea hacia la cifra superior para llegar al número entero, por ejemplo, si el número de equipos resulta ser un valor de 18,2 CAEX, la cifra se redondeará a 19 equipos.

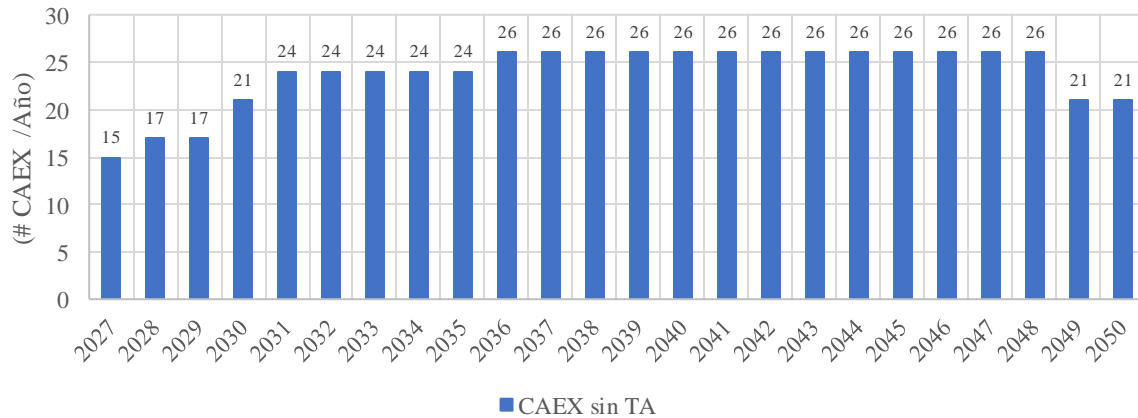


Figura 39: CAEX sin TA ajustado.

6.1.1 Selección cantidad número de pantógrafos

Luego de obtener la productividad de los equipos TA, es importante poder conocer cuántos equipos de transporte será recomendado poder aplicarle retrofit. En base a lo que se muestra en la Figura 40, esta muestra que los tonelajes fluctúan durante la vida de la mina, lo cual indica que no todos los años voy a poder estar utilizando en su totalidad los equipos TA que sean elegidos.

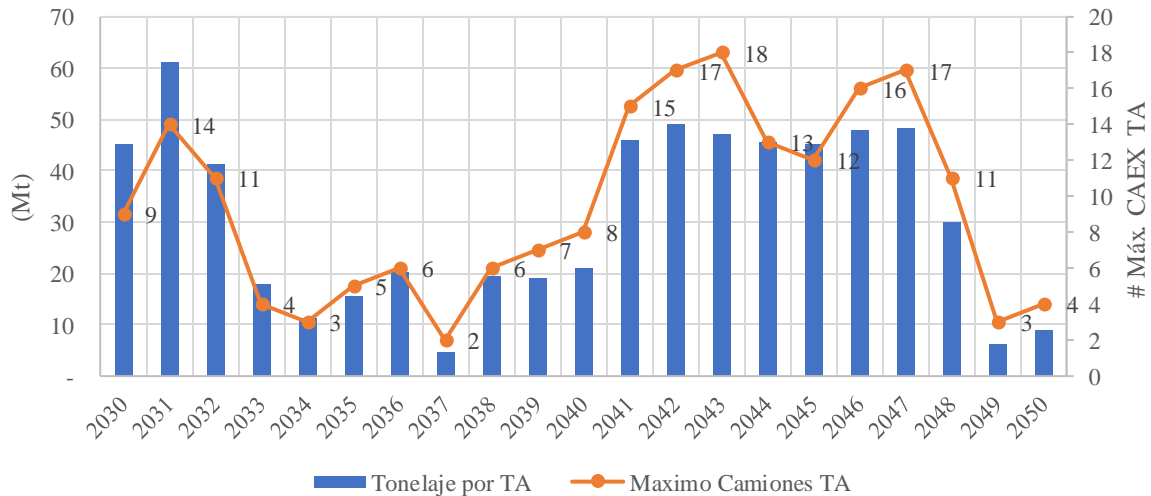


Figura 40: Requerimiento máximo de equipos TA.

Uno de los criterios importantes a considerar es la máxima utilización del equipo TA, debido que hay años en que no se utiliza o no se moviliza tanto de material, tendrá una menor utilización en ese periodo en base a la cantidad de material que podría mover.

En base a la Figura 41 se puede analizar la utilización de estos equipos en base al retrofit por CAEX. Un ejemplo de una baja utilización sucede para el caso de adaptar 14 pantógrafos, como son requeridos el año 2031, pero luego no se vuelve ocupar esa cantidad máxima recién hasta el año 2042, teniendo muchos equipos sin operar por mucho tiempo hacia los destinos que le dan mayor valor a la tecnología. Para el caso de 14 pantógrafos adaptados este da una utilización de 61,7% de los equipos *trolley* a lo largo de la vida de la mina.

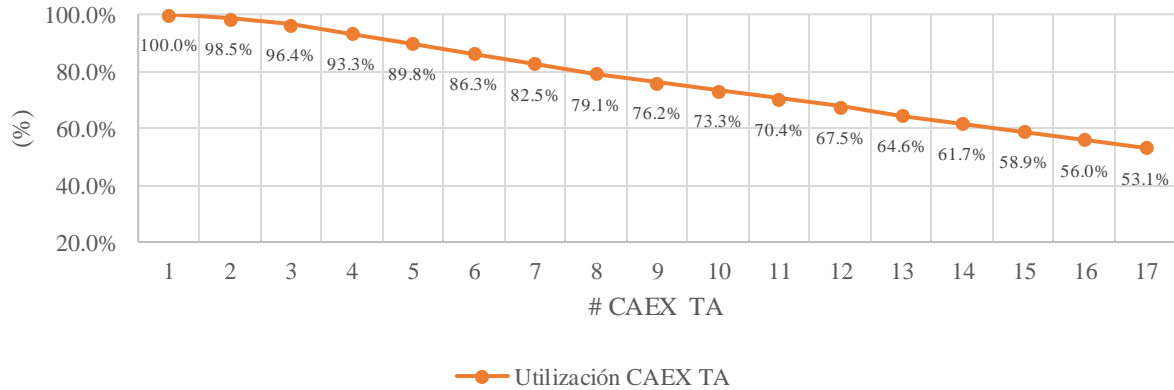


Figura 41: Utilización de equipos TA con respecto al tonelaje a mover.

Para obtener una buena utilización de los equipos, se recomendará llegar a un valor por sobre el 90%, por lo que se recomienda una estrategia en base a los tonelajes que pasan a lo largo de las rampas activadas. En la Figura 42 se muestra el escenario recomendado para el caso de estudio en donde la utilización de equipos llega a un valor de 90,5%, teniendo un vector de equipos con pantógrafo máximo de 9 CAEX TA, en los periodos donde se mueve mayor tonelaje TA según el plan de la mina.

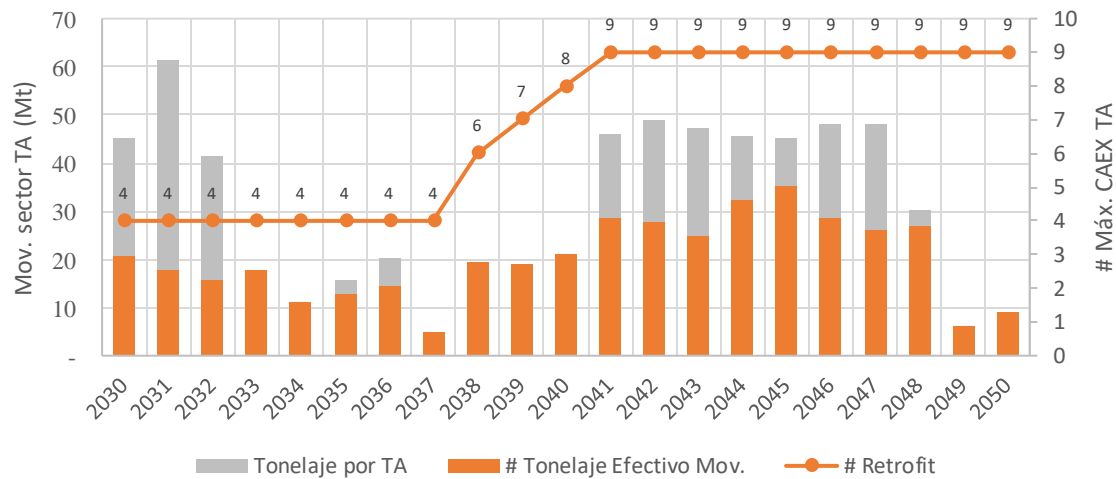


Figura 42: Caso optimo de utilización de pantógrafos.

Considerando la selección de pantógrafos este asegura una utilización de 90,5% del uso de estos equipos, esto desde que se activa la primera rampa trolley en el 2030 hasta el final de la mina.

6.1.2 Dimensionamiento de flota con TA

El resultado del cálculo de equipos se realiza utilizando la Ec.(13), donde se considerará la productividad calculada con la tecnología TA de los equipos adaptados con pantógrafo. Dicho cálculo de equipos total se muestra en la Figura 43.

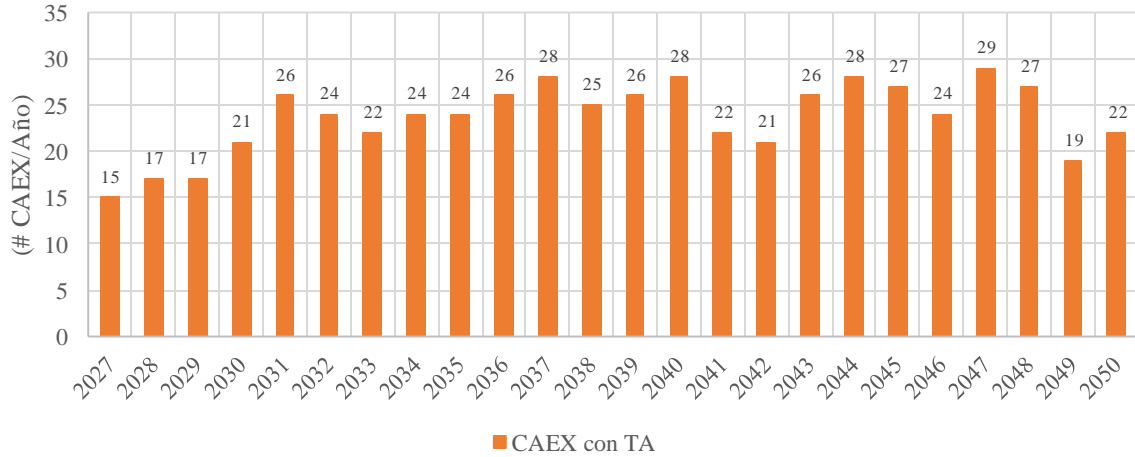


Figura 43: Calculo CAEX con TA.

Al obtener dichos resultados es importante poder ajustar los indicadores de los equipos, esto con la misión de no sobre estimar flota y lograr una buena utilización con la flota de transporte. Luego para sensibilizar la flota y adaptar los indicadores entregados por plan para suavizar el vector de equipos requeridos para la mina, estos quedan reflejados en la Figura 44.

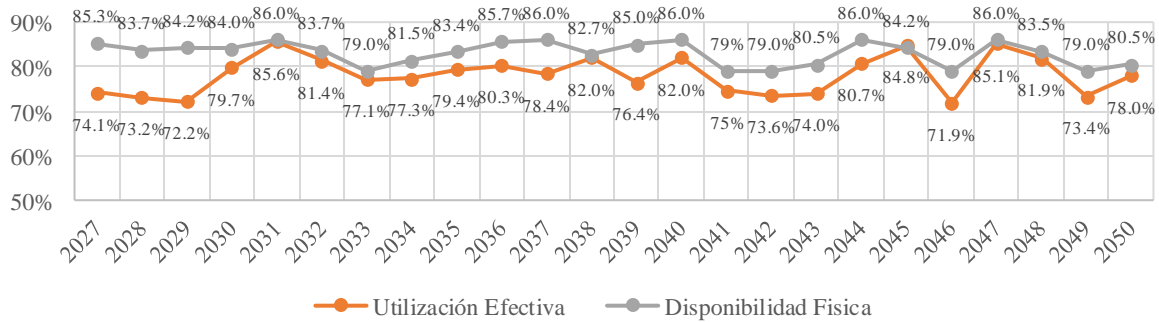


Figura 44: Disponibilidad física y utilización efectiva ajustada.

Ajustando estos indicadores de desempeño se incorpora el cálculo de CAEX tradicionales más los trolley que se muestran en la Figura 45. Cada calculo se redondea hacia la cifra superior para llegar al número entero igual que en el caso anterior.

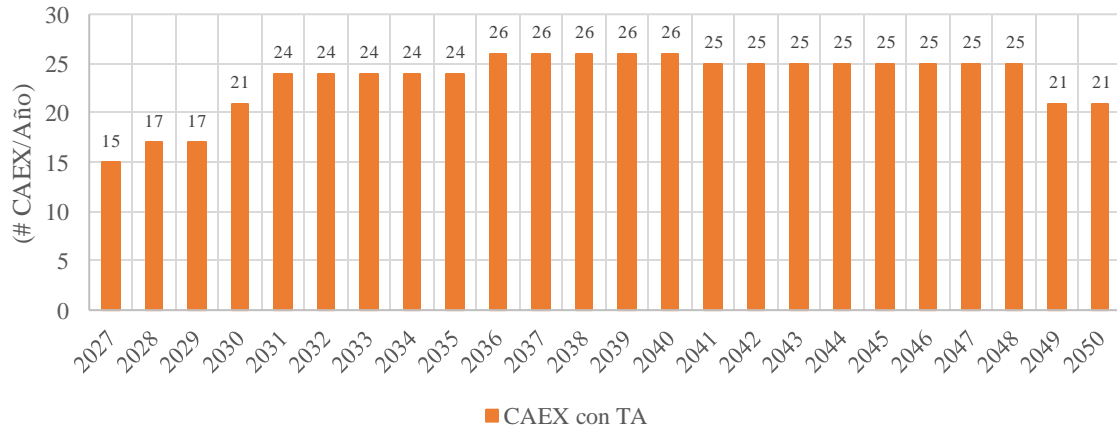


Figura 45: CAEX con TA ajustado.

En la Figura 45 se muestra un ahorro de CAEX desde el año 2041, que es donde se importa la mayor cantidad de equipos con pantógrafo en la mina, al ser más productivos estos permiten ahorrar la demanda de un equipo, por lo que es un aporte en el análisis económico.

6.1.3 Ahorro de combustible

Luego de observar el dimensionamiento de equipos, es importante poder estimar los consumos de combustible al implementar este sistema a la flota con el objetivo de descarbonizar. Los resultados de consumo de combustible anual de la flota tradicional se encuentran en la Figura 46.

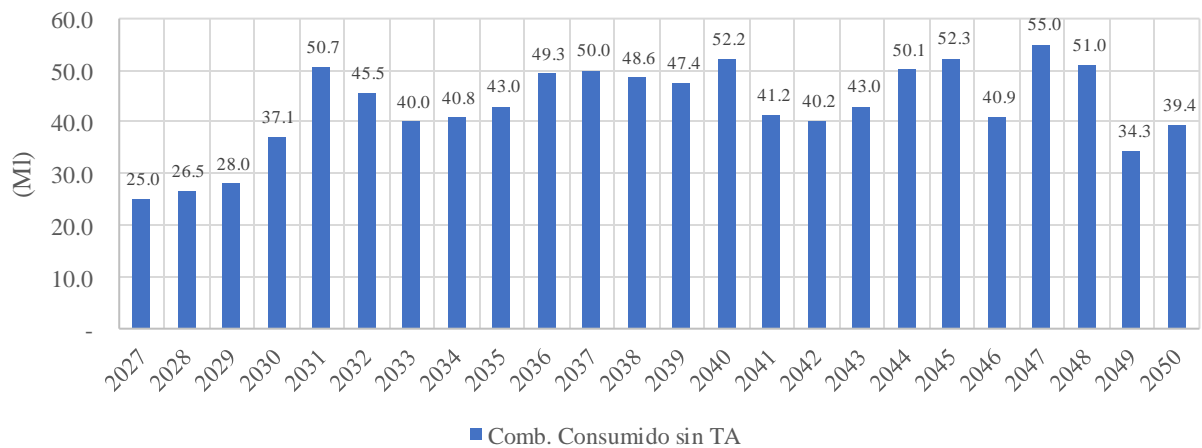


Figura 46: Consumo de combustible anual flota tradicional.

Luego para la flota con retrofit, se dimensiona la cantidad de consumo de combustible anual, el cual genera un aporte por cada pasada por la rampa TA. Este consumo de combustible se muestra en la Figura 47.

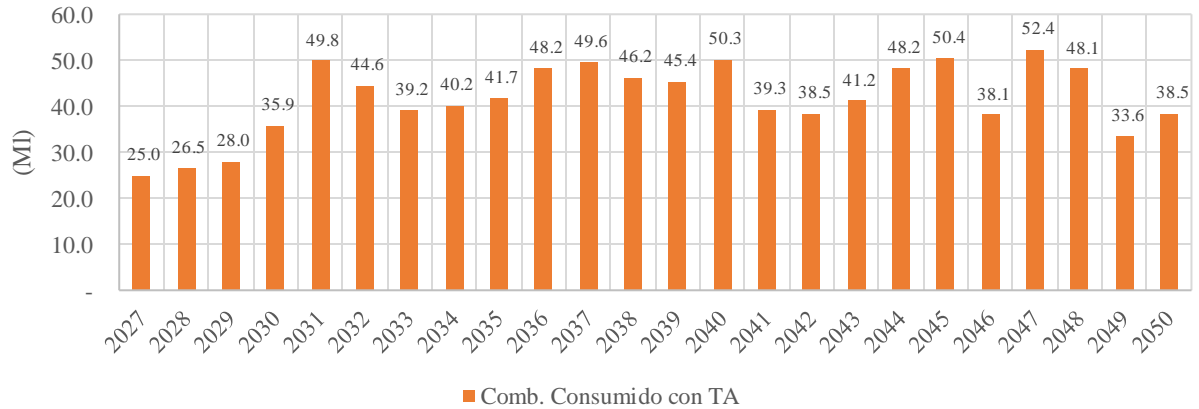


Figura 47: Consumo de combustible anual flota TA caso de estudio.

Finalmente, para nivel de análisis se plasmará en la Figura 48 el máximo potencial de ahorro de combustible. Este consumo de combustible contemplara el caso si toda la flota que se requiere hacia ese sector de beneficio *trolley*, se encuentra con pantógrafo, obteniendo el máximo aporte de ahorro de combustible de la mina.

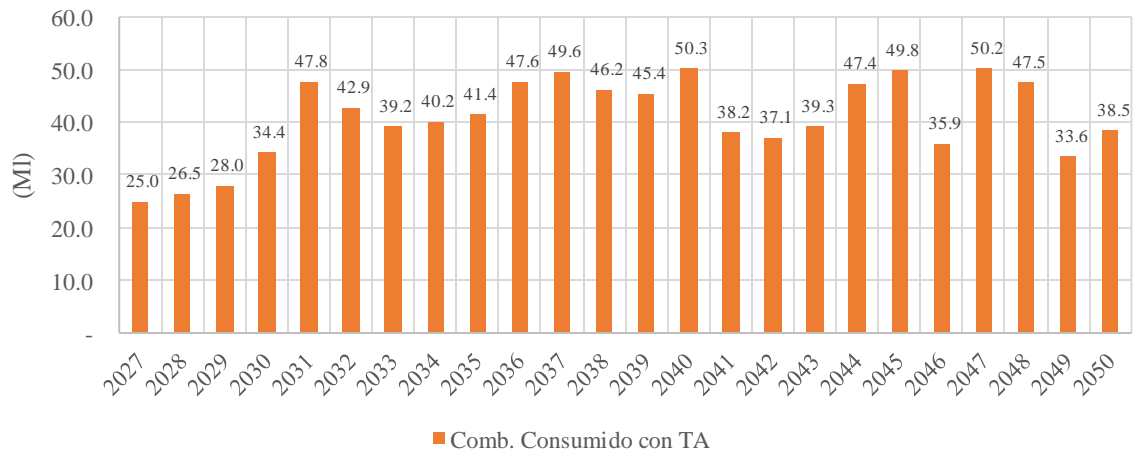


Figura 48: Consumo de combustible anual flota TA caso full.

6.2 Valorización económica

Cada retrofit por equipo según los costos considerados será de 1,1 (MUSD), además de la instalación de subestaciones que contemplan para una ruta de 1 448 (m) (rampa de máxima extensión), se requerirá una inversión de 8,2 (MUSD).

Considerando la cantidad de CAEX con retrofit propuesta, que para el caso de este ejercicio son 4 CAEX TA en los primeros periodos, para luego llegar a un máximo de 9 CAEX TA desde el año 2041. Como en el periodo desde el 2041 en adelante, la demanda de un equipo de transporte disminuye en una unidad, este se agregará al ejercicio económico.

Se considerará el supuesto que para el ejercicio en el periodo que se disminuye la flota de CAEX, se pueda ahorrar una renovación de equipo, ya que la vida útil de los equipos rodea los 15 años aproximadamente, este ingresará al ejercicio económico como el ahorro de un equipo.

Con la selección de pantógrafos óptimos, se considera la inversión de infraestructura en las rampas, el retrofit de equipos, la instalación y construcción de postaciones en la rampa y además la reubicación en el periodo correspondiente a la estrategia considerada. En la Tabla 15 se entregarán los detalles de CAPEX durante el periodo de la mina.

Tabla 15: Detalles de CAPEX durante el periodo de la mina.

Periodo	Descripción de Costo	Costo de inversión (USD)
2030	Subestación eléctrica para abastecer la línea <i>Trolley Assist</i> BOT_NE.	4 098 000
	Línea eléctrica instalada para los primeros 522 (m) en rampa.	2 244 600
	Retrofit de primeros 4 CAEX TA.	4 377 400
2032	Extensión de línea eléctrica para de rampa BOT_NE de 522 (m) hasta 768 (m) de largo.	1 057 800
2038	Retrofit de 2 CAEX TA más.	2 188 700
2039	Retrofit de 1 CAEX TA más.	1 094 350
2040	Retrofit de 1 CAEX TA más.	1 094 350
2041	Reubicación de subestación eléctrica para abastecer la línea <i>Trolley Assist</i> en la rampa BOT_SN.	2 049 000
	Retrofit de 1 CAEX TA para tener un total de 9 CAEX TA operando.	1 094 350
2046	Extensión de línea eléctrica para rampa BOT_SN de 296 (m) hasta un largo de 1 064 (m).	1 272 800
2048	Extensión de línea eléctrica para rampa BOT_SN de 384 (m) hasta un largo de 1 448 (m).	1 651 200
TOTAL		22,2 (MUSD)

Los valores de beneficio o el aporte que entrega la tecnología durante toda la vida útil de la mina se calculan mediante la Ec.(22) entregando un resultado de 35,7 (MUSD) los cuales comprenden diferentes aportes en diferentes periodos de tiempo. El ejercicio económico para poder calcular el VAN de este caso se ve reflejado en la Tabla 16, analizando el aporte económico por cantidad de pasadas, el ahorro de un equipo de transporte y los costos de inversión.

Tabla 16: Evaluación caso de negocio.

Año	2030	2031	2032	2033	...	2040	2041	2042	...	2047	2048	2049	2050
Nº Camiones TA	4	4	4	4	...	8	9	9	...	9	9	3	4
Tonelaje por TA (Mt)	45.4	61.3	41.5	18.0	...	21.0	46.0	49.1	...	48.2	30.1	6.3	9.1
Nº vueltas por CAEX TA	17 375	15 244	13 173	16 349	...	9 880	10 735	10 383	...	9 890	10 123	9 308	7 826
Aporte combustible (USD)	17,3	17,3	26,6	26,6	...	26,6	19,8	19,8	...	39,9	56,1	56,1	56,1
Costo electricidad (USD)	-6,4	-6,4	-9,7	-9,7	...	-9,7	-7,3	-7,3	...	-14,6	-20,5	-20,5	-20,5
Aporte crédito CO2 (USD)	1,1	1,1	1,7	1,7	...	1,7	1,3	1,3	...	2,5	3,5	3,5	3,5
Aporte por pasada (USD)	12	12	18.6	18.6	...	18.6	13.8	13.8	...	27.9	39.1	39.1	39.1
Beneficio por año (MUSD)	0.8	0.7	1.0	1.2	...	1.5	1.3	1.3	...	2.5	3.6	1.1	1.2
Ahorro por CAEX (MUSD)	-	-	-	-	...	-	6.3	-	...	-	-	-	-
CAPEX (MUSD)	10.7	-	1.1	-	...	-	6.4	-	...	-	1.7	-	-
Total sin tasa de descuento (MUSD)	-9.9	0.7	-0.1	1.2	...	0.3	5.2	1.3	...	2.5	1.9	1.1	1.2

Considerando para este ejercicio una tasa de descuento de 7%, la selección de dos rampas con temporalidades distintas cumpliendo con la condición de una rampa en simultaneo y un retrofit máximo de un total de 9 equipos TA, dan como resultado económico lo que se muestra en la Tabla 17.

Tabla 17: Resultado de indicadores financieros para caso de estudio.

Indicador Financiero	Valores
VAN	676 235 (USD)
TIR	7,66 (%)
IVAN	0,063 (-)
Payback	18 (Años)

Por otro lado, se puede analizar sin considerar la utilización de pantógrafos como se analizó en el capítulo 6.1.1, solo centrándose en el valor actualizado neto. Al enfocar el ejercicio para el análisis del VAN, y sin importar la utilización de pantógrafos, este da casos de negocio distintos al iterar el número de pantógrafos, estos resultados se ven plasmados en la Figura 49.

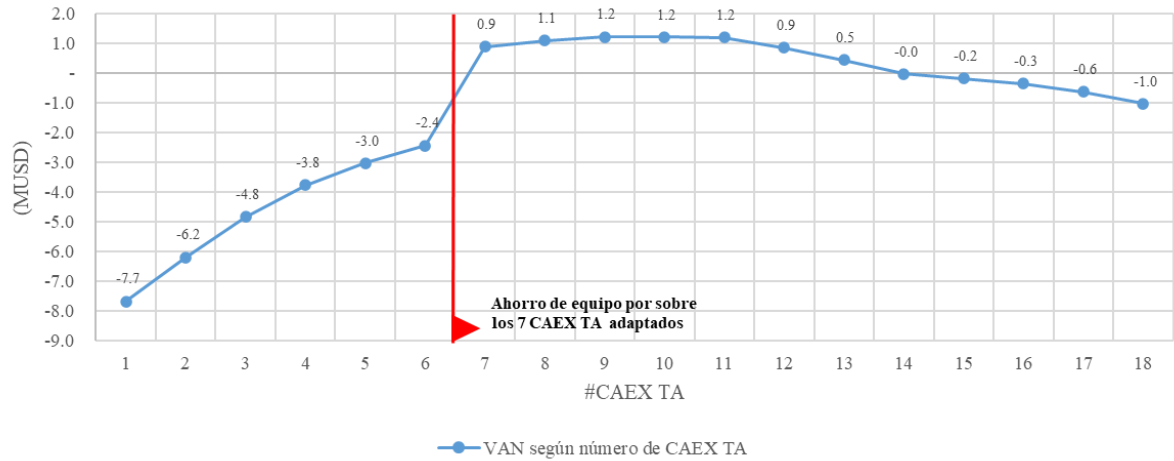


Figura 49: Iteración de VAN de acuerdo con el número de pantógrafos.

En la figura se muestra que desde los 7 CAEX TA adaptados, sucede un ahorro de equipo para el ejercicio económico de flota, por lo que el mejor escenario para esta evaluación va desde la adaptación de 9 retrofit, alcanzando un VAN de 1,23 (MUSD).

7 Discusión de resultados

Dentro de los datos adquiridos se puede observar que la distribución de tonelajes y movimientos de material en el plan durante la vida útil de la mina está concentrada en el movimiento hacia los botaderos. Esto permite evaluar el análisis de la tecnología en el sector expit ya que puede dar la ventaja de aumento de velocidad al construir una tercera pista, factor que es más complejo al evaluar rampas inpit dentro del tajo. En cuanto a la distribución de tonelaje el botadero sur muestra una ventaja importante por sobre el botadero norte de 456 (Mt) más hacia ese sector.

En el análisis por pasada se pueden observar ventajas de velocidad en los tramos donde en la mayoría de los casos esta aumenta en un 80,3%, ayudando a que los CAEX TA puedan ser más rápidos y a la vez más productivos. Además del ahorro de emisión de CO2, este aporta en un 97% a 98% por pasada, esto debido a que los CAEX al estar conectados en la línea solo generan un consumo en estado ralenti.

En la Figura 26 se puede observar el contraste que tiene la tecnología. Por una parte, se genera una reducción de consumo de combustible, pero a su vez se considera un consumo de electricidad en la línea eléctrica, por lo que es importante conocer las tarifas con las que trabajan las mineras, ya que es un input importante para determinar si el caso de estudio flota puede flotar de mejor manera o no.

Al analizar el aporte por pasada de cada una de las rampas analizadas se llevó a cabo que la elección para este análisis económico se realizaría con las rampas BOT_NE y BOT_SN, las cuales generan un aporte de 15,1 (MUSD) y 25 (MUSD) respectivamente como potencial económico (ver Tabla 18), esto considerando el costo y consumo de electricidad. Estos resultados potenciales podrían generar este ingreso si todo el tonelaje que se mueve hacia estos destinos es transportado con la tecnología *Trolley Assist*.

Tabla 18: Resumen potencial aporte rampas candidatas.

Tramo trolley	Aporte por pasada (USD)	Tonelaje (Mt)	# Pasadas	Aporte por tramo (kUSD)	Aporte por rampa (kUSD)
BOT_NE_1	12,0	106,6	361 578	4 351	15 138
BOT_NE_2	18,6	171,2	580 425	10 788	
BOT_SN_1	13,8	258,4	876 128	12 081	25 030
BOT_SN_2	27,9	96,3	326 541	9 098	
BOT_SN_3	39,1	29,1	98 491	3 851	

Luego de simular dicho escenario, estas rampas consideradas brindaran el aporte que entrega la tecnología TA, el efecto de mayor velocidad que ayuda a la reducción de tiempo de ciclo, como también al ahorro de combustible. En la Figura 50 se muestran los aportes de tiempo de la tecnología con respecto a la flota tradicional. En donde los años que más destacan son los que se mueve la mayor cantidad de material en ese periodo y en las mejores extensiones de la tecnología TA que son en el caso del BOT_SN.

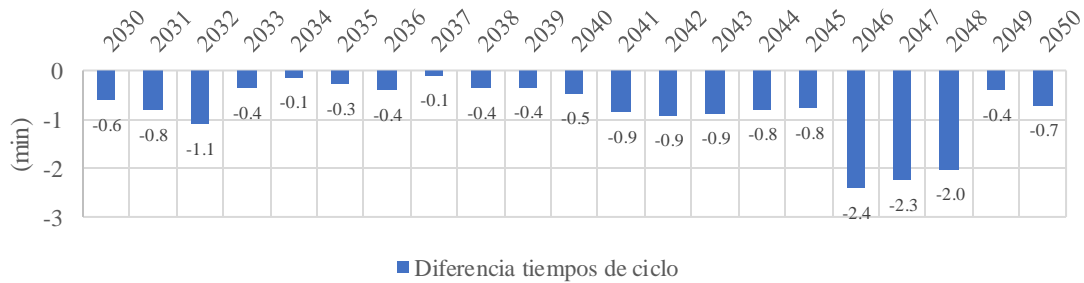


Figura 50: Diferencia de tiempos de ciclo.

Además, hay que señalar que, en los primeros periodos del plan, que van desde el 2027 al 2029, no hay ninguna rampa activa por lo que no existe un aporte de velocidad. Y para los años 2034 y 2037 se puede observar que la reducción en tiempo es muy mínima o incluso nula, debido al poco tonelaje que pasa por este sector en estos periodos.

Al mostrar los aportes de tiempo de ciclo, es importante poder comparar además las productividades que tienen los equipos TA. En la Figura 51 se muestran los aportes de productividad que brindan los equipos TA por sobre los equipos tradicionales.

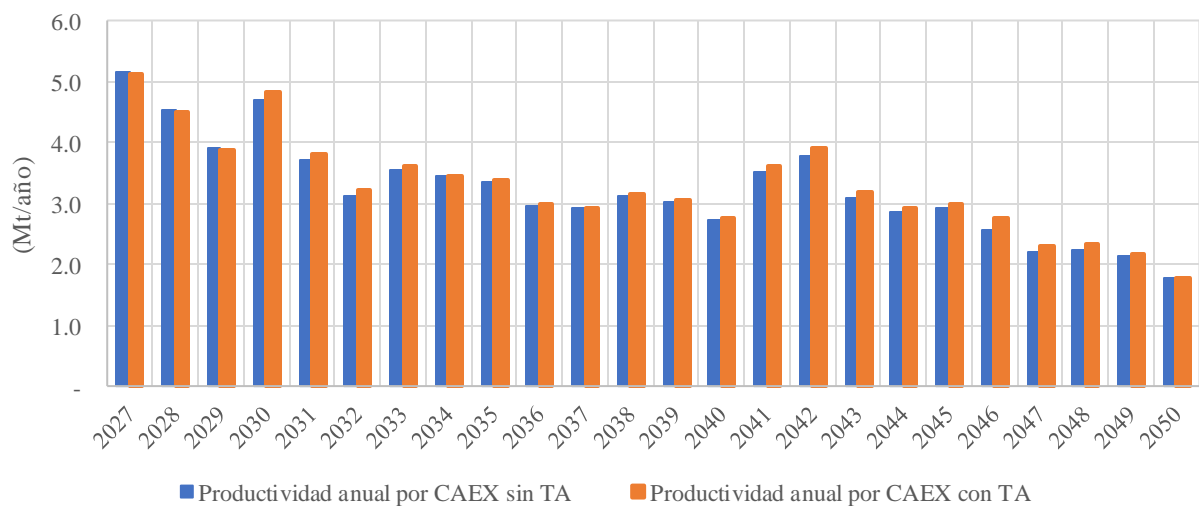


Figura 51: Aporte de productividad sistema TA.

En base a las productividades y el ajuste de indicadores para el cálculo de flota de transporte, es posible reducir un CAEX desde el año 2041. Esto indica que con el retrofit de 9 CAEX TA y una extensión de rampa importante con un buen aporte y alto movimiento de material, es posible poder reducir solamente un CAEX del plan (ver Figura 52).

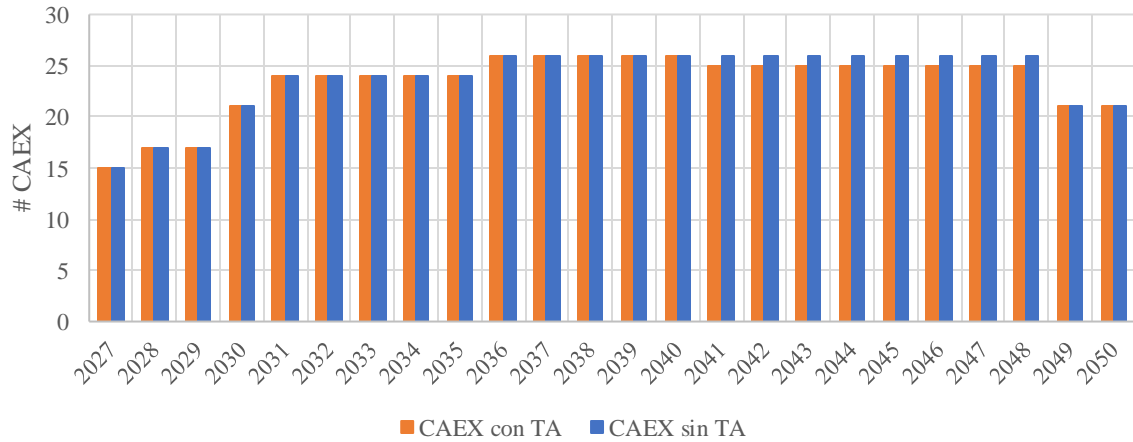


Figura 52: Cantidad de equipos tradicionales y TA.

La diferencia de consumos de combustibles para cada caso se muestra en la Figura 53, que es uno de los resultados que dan valor para el ahorro de emisiones y potencial de beneficio para el ejercicio económico.

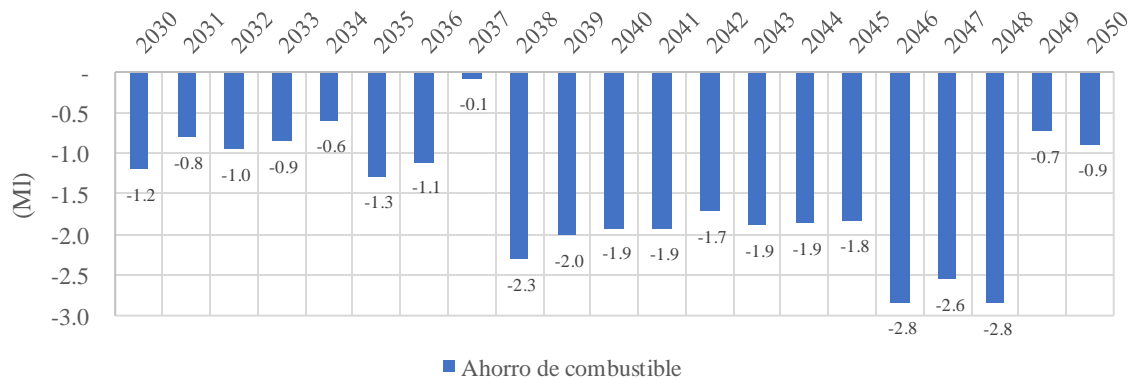


Figura 53: Ahorro de consumo de combustible anual caso de estudio.

Por parte del consumo de estos equipos dimensionados, la diferencia de consumos de combustible brinda un aporte de emisiones no emitidas. Considerando el factor de 2,67 (kgCO₂/l), se puede conocer la cantidad de emisiones que se evitan. En la Figura 54 se muestran las toneladas de CO₂ que se pueden evitar al implementar la tecnología.

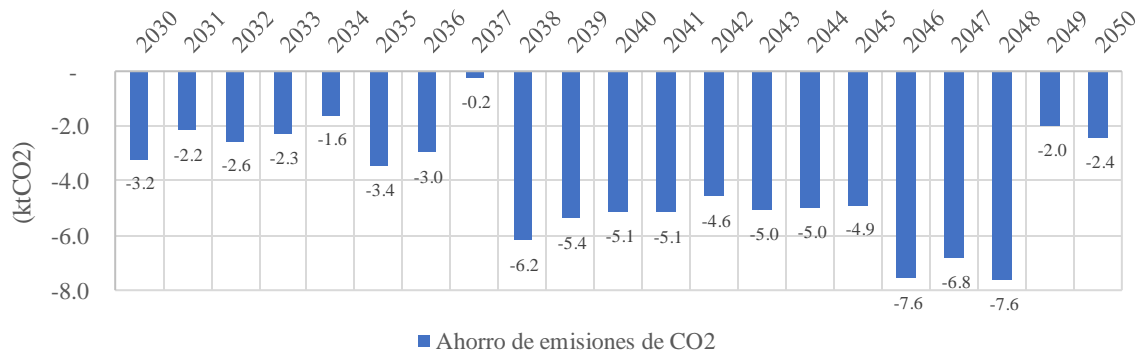


Figura 54: Ahorro de emisiones de CO2 con tecnología TA caso de estudio.

Para mostrarlo de una forma más representativa, en la Figura 55, se muestra el aporte porcentual que logra descarbonizar la tecnología *Trolley Assist*, entregando un aporte de descarbonización por año de acuerdo con el plan.

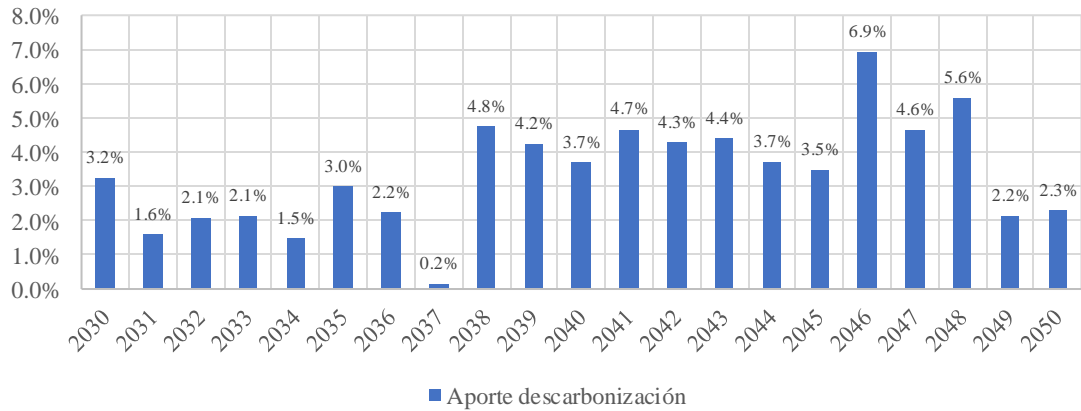


Figura 55: Aporte de descarbonización de tecnología *Trolley Assist* anual caso de estudio.

Los valores más altos de descarbonización son debido a la alta cantidad de tonelaje hacia estos sectores. El aporte del ejercicio completo entrega un resultado de descarbonización potencial del 3,4% en el caso de aplicarle el retrofit correspondiente. Por otro lado, como valor máximo de descarbonización para este escenario de dos rampas y si todo el tonelaje fuera transportado por la flota TA (full TA), el potencial de descarbonización es de un 5,2%. De acuerdo con las metas de descarbonización que desean alcanzar las mineras, no basta solo con la tecnología *trolley* para la meta de carbono neutralidad.

Dentro de lo económico uno de los altos costos de inversión son la subestación eléctrica más la línea de transmisión y el retrofit de los CAEX. El ejercicio tuvo la finalidad de poder reubicar la subestación y aprovechar la compra de la infraestructura para reutilizarla en el otro sector y temporalidad. Contemplando un valor de CAPEX de 22,2 (MUSD). Es importante poder evaluar que estos costos puedan disminuir, ya que para efectos del ejercicio estos gastos es difíciles poder abordarlos tan solo con el ahorro de combustible y crédito por descarbonizar.

Analizando y dándole un énfasis a la utilización de la tecnología sobre el 90% se determinó que para el primer periodo cuando se encuentra disponible la rampa BOT_NE, el número óptimo es de 4 pantógrafos. Luego cercano a la temporalidad donde aparece la otra extensión que es hacia el sector sur a la rampa BOT_SN, esta presenta un mayor movimiento de material, y el número óptimo sube a 9 pantógrafos.

Considerando el aporte por pasada de cada una de las rampas y la cantidad de veces que pasan los equipos con retrofit por el sector, se puede conocer un valor total de beneficio aproximado de 35,7 (MUSD). Incorporando el CAPEX, el cual considera los costos asociados a infraestructura eléctrica, retrofit de equipos e instalación de la línea eléctrica, se logra llegar a un resultado estimado de 0,68 (MUSD) como VAN, considerando una tasa de descuento del 7%.

Dicho resultado es positivo, pero no es un indicador que nos entregue un valor favorable para decir que el proyecto es rentable económicamente. Al ser un proyecto que se paga muy al largo plazo corre riesgos financieros, ya que es difícil predecir el comportamiento del mercado para esas fechas y la rentabilidad que genera es baja, la cual podría ser mejorada con alguna estrategia adicional para la tecnología.

Analizándolo solo por el lado económico y no de un aprovechamiento como tal de la tecnología, en la Figura 49 se puede contemplar que el mejor VAN es de 1,23 (MUSD), el cual corresponde al caso de aplicar un retrofit de 9 CAEX TA. El riesgo es que hay algunos años en que la flota no se podrá utilizar para su adaptación ya que la demanda de movimiento de material a botadero es muy baja en ciertos periodos.

8 Conclusiones y recomendaciones

- Se puede considerar que para este caso en específico de negocio y como fue abordado la tecnología *Trolley Assist* logra ser marginalmente viable, considerando el bajo margen de rentabilidad con el que cuenta y el largo periodo de recuperación de la inversión, no es del todo atractivo financieramente. La evaluación en rampas expit puede que no basten para poder hacer que el proyecto flote de mejor manera, debido a los altos costos de inversión, a las tarifas de combustible y electricidad, además de no agregar para este estudio otros aportes como lo son la mantención de los equipos diesel. Se recomienda evaluar un caso combinado con una inpit, para aprovechar el retrofit de los equipos y darles mayor aporte a las rutas existentes en la mina.
- Un ratio importante que se puede incorporar a este tipo de estudios de evaluación es uno compare las tarifas de electricidad y diesel, los cuales entregan un indicador de aporte por pasada importante para el aporte económico del ejercicio. Tan simple como “Tarifa de combustible/Tarifa de electricidad” en donde mientras más alto sea el valor, mayor pueda ser el caso de negocio que se va a evaluar. A pesar de que la tecnología ha podido ser implementada en otras partes del mundo, es fundamental que las tarifas de electricidad y combustibles estén a favor de la electrificación de la industria minera.
- Dentro de este estudio solo se consideran ahorros de consumo de combustible, contrarrestado con el consumo de electricidad y premios por evitar emisiones de CO₂. Una de las variables que igual serían importantes para futuros estudios considerar un ahorro de mantenimiento, ya que se extienden la vida de los motores diesel al estar utilizando la línea eléctrica el equipo de transporte.
- Se debe señalar que sería importante poder conocer la vida útil de las subestaciones eléctricas, como también la vida útil de la infraestructura instalada en los camiones. Para este estudio se consideró que la inversión de estos elementos es capaz de durar durante toda la vida de la mina, sin contemplar su correspondiente mantenimiento y duración.
- Una recomendación importante sería poder iterar los casos de negocio, pudiendo ver como resulta el caso al sensibilizar diferentes variables, como por ejemplo pueden ser las tasas de descuento de mercado, las tarifas de combustible o electricidad, o directamente la cantidad de equipos con retrofit para la mina que sea evaluada.
- Los beneficios que brinda la tecnología no solo son medibles en productividad y un escenario económico rentable, sino que pueden dar valor a las empresas que invierten en este tipo de tecnologías comprometidas con la descarbonización. Entregan una mejor imagen para la empresa que pueda implementarlo y llevarlo a cabo dentro de su operación mina.

- Debido a que las empresas buscan reducir sus emisiones, colocándose metas de descarbonización para los años 2030 o 2050, el *trolley* no puede ser suficiente en base a este estudio. En la industria están surgiendo más tecnologías que necesitan ser evaluadas para lograr ver si brindan el aporte para poder cumplir estos compromisos de carbono neutralidad. Dentro de ellas se encuentran los equipos *Hybrid Electric Vehicle* (HEV), *Battery Electric Vehicle* (BEV), *In-Pit Crush and Convey* (IPCC) o *Fuel Cell Electric Vehicle* (FCEV), dentro de las cuales algunas se puedan complementar con la tecnología *Trolley Assist* como componente de carga dinámica en zonas estratégicas.

9 Referencias

- Alastri Software. (2024). *Alastri*. Obtenido de <https://www.alastri.com/es/software/haul-infinity/>
- COCHILCO. (2022). *Anuario de Estadísticas del Cobre y Otros Minerales 2003-2022*. Obtenido de <https://www.cochilco.cl/Paginas/Estadisticas/Publicaciones/Anuario.aspx>
- Codelco Chile. (Junio de 2005). *Scribd*. Obtenido de <https://es.scribd.com/presentation/327256219/Norma-Asarco-Codelco-Chuquicamata>
- Delevingne, L., Glazener, W., Grégoir, L., & Henderson, K. (28 de Enero de 2020). *McKinsey Sustainability*. Obtenido de <https://www.mckinsey.com/capabilities/sustainability/our-insights/climate-risk-and-decarbonization-what-every-mining-ceo-needs-to-know>
- Guijarro, S. (02 de Diciembre de 2021). *Centro nacional de pilotaje de tecnologías para la minería*. Obtenido de <https://pilotaje.cl/preparan-guia-de-lixiviacion-clorurada-para-la-mineria/>
- Haiming Bao, P. K. (2023). Productivity estimation of battery trolley mining truck fleets.
- Haiming Bao, P. K. (2024). Energy Consumption and Battery Size of Battery Trolley Electric.
- Legge, H., Müller-Falcke, C., Naucclér, T., & Östgren, E. (29 de Junio de 2021). *McKinsey & Company*. Obtenido de <https://www.mckinsey.com/industries/metals-and-mining/our-insights/creating-the-zero-carbon-mine>
- Los Pelambres AMSA. (Mayo de 2022). *4e Chile*. Obtenido de <https://4echile.cl/wp-content/uploads/2022/05/GIZ-Trolley-MLP-vP.pdf>
- Mazumdar, J. (2011). Performance Improvement of Mining Haul Trucks . *Industry Solutions - Mobile Mining Siemens Industry Inc.*
- Mazumdar, J. (2013). All Electric Operation of Ultraclass Mining Haul Trucks. *Drive Technologies - Mobile Mining Siemens Industry Inc.*
- Parra, A. (Noviembre de 2015). *Laboratorio Delphos*. Obtenido de https://delphoslab.cl/images/workshop/ppts/Sistemas_de_Transporte_en_Mineria_de_Cielo_Abierto.pdf

- Siemens AG. (2019). *SIMINE Haul Truck*. Obtenido de <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:f239d4ee-c330-4fa0-be6b-dddb4dce1ab5/brochure-simine-truck-en.pdf>
- Valenzuela Cruzat, J., & Valenzuela, M. A. (2018). Modeling and Evaluation of Benefits of Trolley Assist System for Mining Trucks .