



**UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL**

EVALUACIÓN ECONÓMICA CAMIONES AUTÓNOMOS VS CONVENCIONALES

**TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGÍSTER EN GESTIÓN Y
DIRECCIÓN DE EMPRESAS**

MARCELO HERNÁN ZÚÑIGA ESTAY

**PROFESOR GUÍA:
IVAN MIGUEL BRAGA CALDERON**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
CHRISTIAN ANDRE DIEZ FUENTES
SERGIO VASQUEZ BRONFMAN**

**SANTIAGO DE CHILE
2021**

RESUMEN

EVALUACIÓN ECONÓMICA CAMIONES AUTÓNOMOS VS CONVENCIONALES

En los últimos años, la rapidez de avance de algunos yacimientos ha disminuido considerablemente afectada por las bajas leyes de cobre, esto ha provocado que la tarea de extracción de mineral sea cada vez más compleja, profunda y peligrosa, impactando negativamente en los costos de producción.

La operación unitaria de transporte de material representa el mayor costo en el proceso minero, por lo que las compañías se están atreviendo a apoyarse en el avance tecnológico en busca de un proceso más ágil, más seguro y a menor costo. Para ello se ha incorporado maquinaria capaz de funcionar sin operadores, a esto se le denomina maquinaria autónoma.

En el año 2006, la tecnología autónoma llega a Chile como sistema de prueba a la División de Codelco, Radomiro Tomic. La que luego, en el año 2007, comenzó su implementación en la faena minera en estudio y con el tiempo pasó a convertirse en la primera mina a nivel mundial en operar con una flota de transporte compuesta en su totalidad por camiones autónomos.

A pesar de los años transcurridos, la información real es escasa y gran parte de ella es proporcionada por el propio proveedor, por lo que se hace necesario para la compañía, calcular y comparar en base a datos históricos la eficiencia económica entre el sistema de transporte autónomo v/s convencional.

Debido a lo anterior, el presente trabajo consistió en evaluar la mejor estrategia económica de transporte de minerales para una faena minera a rajo abierto que transporta 76.000 kton por año, considerando la opción de continuar operando con una flota autónoma o con una flota de camiones convencionales, abarcando un horizonte de tiempo desde el año 2020 al año 2027.

El estudio buscó comprender cuales son los costos en los que incurre cada uno de los sistemas de transporte para su operación. Para ello en primera instancia se compararon parámetros operacionales de disponibilidad, uso operativo y utilización, a partir de los cuales tienen un importante impacto a la hora de definir la cantidad de camiones que deben componer cada flota de transporte y los costos asociados a ella.

Para la valorización de cada flota se realizó un estudio de costos de los años 2018 y 2019 de una operación autónoma y una operación convencional, obteniéndose inputs económicos de consumo de neumáticos, consumo de combustible, costo por operadores, costo por contrato de sistema autónomo, costo en lubricantes, y costo por servicios prestados a la operación de transporte por parte de equipos de movimiento de tierra como bulldozer, wheeldozer y motoniveladoras.

Los resultados obtenidos mostraron que la flota autónoma tiene un aumento en parámetros de disponibilidad, uso operativo y utilización efectiva de los equipos, lo que se traduce en un menor costo de transporte de 0,50 USD/ton comparado con los 0,57 USD/ton de una flota convencional y un valor actual de costos de 218 MUSD para la flota autónoma y 246 MUSD para la flota convencional. Lo anterior dado a que la flota autónoma presentó una importante disminución en los costos de neumáticos, combustible y mantenimiento, además del menor gasto en operadores.

TABLA DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN.....	1
	Motivación del estudio.....	1
	Objetivos.....	2
	Objetivo general	2
	Objetivos específicos	2
	Metodología de trabajo.....	2
	Alcances.....	3
2	ANTECEDENTES	4
	Antecedentes de la empresa.....	4
	Descripción de la faena en estudio	4
	Descripción del proceso productivo.....	6
	Camión de extracción (CAEX)	7
	Automatización de camiones mineros en minas a rajo abierto.....	8
	Sistema de transporte autónomo	10
	Componentes del Sistema Autónomo	11
	Central autónoma	11
	Computador de Campo	11
	Antena y receptor GPS.....	12
	Radio Ethernet	12
	Sensores OEM.....	12
	Red inalámbrica de comunicación.....	12
	Componentes de seguridad.....	14
	Marco teórico	18
	Modelo de ASARCO	18
	OPEX 21	
	Tasa de descuento e inflación	21
	Simulación.....	21
	Estadística	22

@Risk	22
Documento Exhibit	23
Documento PND	23
Mantenimiento	23
2.1.1.1 Full MARC:	23
2.1.1.2 MARC.....	24
2.1.1.3 Labor Plus Part.....	24
3 DESARROLLO	25
Recolección de información de parámetros operacionales de camiones autónomos y camiones convencionales.....	25
Disponibilidad	25
Uso operativo.....	27
UEBD	29
Duración de Neumáticos	31
Consumo de lubricantes	32
Recopilación de información económica de camiones autónomos y convencionales	33
Combustible.....	34
Neumáticos	35
Lubricantes.....	36
Contrato por servicio autónomo	37
Mantenimiento	38
Remuneraciones	40
Equipos de movimiento de tierra	41
Evaluación Económica	42
Inputs operacionales.....	42
Inputs económicos.....	43
Cálculo de flotas de camiones	45
Consumos anuales	48

3.1.1.1	Consumo Combustible	48
3.1.1.2	Consumo de Neumáticos	49
3.1.1.3	Consumo de Lubricantes.....	50
3.1.1.4	Gasto en Remuneraciones	51
4	RESULTADOS Y DISCUCIONES	52
	Análisis de riesgo	53
	Análisis de sensibilidad.....	61
	Análisis de sensibilidad de VAC.....	61
	Análisis de sensibilidad de costo de transporte	64
5	CONCLUSIONES.....	68
6	BIBLIOGRAFIA	71
7	ANEXOS	73
	Detalle por gasto anual en operador	73
	Cálculo de quipos	73
	Cálculo de consumos por flota	74
	Cálculo de consumo en combustible.....	74
	Cálculo de consumo de neumáticos	74
	Cálculo de consumo de lubricantes.....	74
	Cálculo de operadores.....	75
	Gastos anuales de flota autónoma y flota convencional	75

Índice de Tablas

Tabla 1 - Implementación actual de camiones autónomos a nivel mundial [2].	9
Tabla 2 - Horas de cambio de lubricante y litros a cargar.	32
Tabla 3 - Parámetros operacionales.	43
Tabla 4 - Consumo de combustible según perfil de transporte.	43
Tabla 5 - Velocidades según perfil de transporte.	43
Tabla 6 - Horas de cambio de lubricante y litros cargados.	43
Tabla 7 - Costo de combustible y precio de neumático.	44
Tabla 8 - Costo de lubricantes.	44
Tabla 9 - Costo fijo de mantención.	44
Tabla 10 - Costo variable de mantención.	44
Tabla 11 - Tiempo de carguío según equipo utilizado.	45
Tabla 12 - Porcentaje a cargar por cada equipo de carguío.	46
Tabla 13 - Tiempos de viaje promedio de flota de transporte autónomo.	47
Tabla 14 - Tiempos de viaje promedio de flota de transporte convencional. .	47
Tabla 15 - Costo de transporte de flota autónoma y convencional.	52
Tabla 16 - Gasto anual en operadores	73
Tabla 17 - Consumo de lubricantes de flota de transporte autónoma.	74
Tabla 18 - Consumo de lubricantes de flota de transporte convencional	75
Tabla 19 - Gasto anual flota autónoma	75
Tabla 20 - Gasto anual flota convencional	76

Índice de Figuras

Figura 1 - Costos de operaciones unitarias [1].....	1
Figura 2 - Ubicación geográfica de la faena en estudio.....	5
Figura 3 - Proceso productivo de la faena en estudio.....	7
Figura 4 - Vista general de dimensiones camión KOMATSU 930E-4.....	8
Figura 5 - Computador de campo modelo PTX-C	11
Figura 6 - Antena ground station	13
Figura 7 - Mobile acces point	13
Figura 8 - Componente P2P de un Acces Point.....	14
Figura 9 - Componente CISCO 5 GHz y 2.4 GHz de un Acces Point	14
Figura 10 - Luces modales de operación autónoma.	14
Figura 11 - Sobre de seguridad.	16
Figura 12 - Falsas alarmas de sistema de detección de obstáculos (ODS)...	17
Figura 13 - Modelo de ASARCO.	18
Figura 14 - Histograma de la disponibilidad de la flota de transporte autónoma.	26
Figura 15 - Histograma de la disponibilidad de la flota de transporte convencional.....	27
Figura 16 - Histograma de uso operativo de flota de transporte autónomo. ..	28
Figura 17 - Histograma de uso operativo de flota de transporte convencional.	29
Figura 18 - Histograma de UEBD de flota de transporte autónomo.	30
Figura 19 - Histograma de UEBD de flota de transporte convencional.....	31
Figura 20 - Histograma de horas de baja de neumáticos de flota de transporte autónomo.	32
Figura 21 - Distribución de costos de flota de transporte autónomo.	33
Figura 22 - Distribución de costos de flota de transporte convencional.....	34
Figura 23 - Costo por consumo de combustible.	35
Figura 24 - Costo por consumo de neumáticos.	36

Figura 25 - Costo de lubricantes.....	37
Figura 26 - Costo por contrato de sistema autónomo.....	38
Figura 27 - Costo de mantenimiento.....	39
Figura 28 - costo de mantención detallado de camión autónomo.	40
Figura 29 – Costo por operadores de camión convencional.....	41
Figura 30 - Costo de quipos de movimiento de tierra.	42
Figura 31 - Cantidad de camiones de flota autónoma y convencional.....	48
Figura 32 - Consumo de combustible de flotas de transporte autónoma y convencional.....	49
Figura 33 - Neumáticos consumidos por flota de transporte autónomo y convencional.....	50
Figura 34 - Consumo de lubricantes de flota autónoma y convencional.	51
Figura 35 - VAC de flota autónoma y flota convencional.....	52
Figura 36 - Ajuste de distribución de disponibilidad de flota de transporte autónomo.	53
Figura 37 - Ajuste de distribución de flota de transporte convencional.....	54
Figura 38 - Ajuste de distribución de uso operativo de flota de transporte autónomo.	55
Figura 39 - Ajuste de distribución de uso operativo de flota de transporte convencional.....	56
Figura 40 - Ajuste de distribución de UEBD de flota de transporte autónomo.	57
Figura 41 - Ajuste de distribución de UEBD de flota de transporte convencional.....	58
Figura 42 - Simulación de VAC de flota de transporte autónomo.....	59
Figura 43 - Simulación de costo de transporte de flota autónoma.....	59
Figura 44 - Simulación de VAC de flota de transporte convencional.	60
Figura 45 - Simulación de costo de transporte de flota convencional.	61
Figura 46 - Distribución acumulada de simulación de VAC de flota de transporte autónoma.	62

Figura 47 - Tornado de simulación de VAC de flota de transporte autónomo.
..... 62

Figura 48 - Distribución acumulada de simulación de VAC de flota de transporte convencional..... 63

Figura 49 - Tornado de simulación de VAC de flota de transporte convencional..... 64

Figura 50 - Distribución acumulada de simulación de costo de transporte de flota autónoma..... 65

Figura 51 - Tornado de simulación de costo de transporte de flota autónoma.
..... 65

Figura 52 - Distribución acumulada de costo de transporte de flota convencional..... 66

Figura 53 - Tornado de simulación de costo de transporte de flota convencional..... 67

Índice de Ecuaciones

Ecuación (1) Disponibilidad	20
Ecuación (2) Uso operativo.....	20
Ecuación (3) Utilizacion efectiva	20
Ecuación (4) UEED	20
Ecuación (5) Distancia equivalente	20
Ecuación (6) Tiempo de ciclo	45
Ecuación (7)Tiempo de viaje	46
Ecuación (8) Tiempo nominal por camion.....	73
Ecuación (9) Tiempo operativo por camion.....	73
Ecuación (10) Número de ciclos por camion	73
Ecuación (11) Tonelaje movido por camion en el año	74
Ecuación (12) Número de camiones	74
Ecuación (13) Litros de combustible por perfil de transporte	74
Ecuación (14) Número de neumáticos.....	74
Ecuación (15) Litros de lubricante	74
Ecuación (16) Número de operadores	75

1 INTRODUCCIÓN

Motivación del estudio

En el ámbito de la minería a rajo abierto, el transporte de minerales resulta ser una operación clave y esencial del proceso productivo, permitiendo llevar el mineral desde los puntos de carguío hacia sus destinos finales, ya sea chancado, botaderos o stock.

Dentro de las operaciones unitarias que se realizan al interior de una mina se tiene que la etapa de transporte no solo es relevante del punto de vista operacional, sino que también representa los costos de producción más altos (véase Figura 1 – Costos de operaciones unitarias), siendo estos aproximadamente el 45% de los costos totales [1].

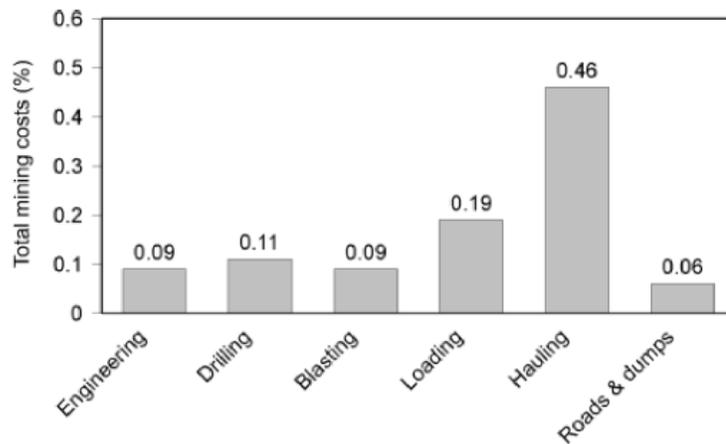


Figura 1 - Costos de operaciones unitarias [1].

Fuente: Sizing equipment for open pit mining-a review of critical parameters, 2003.

Este alto costo de transporte es función del consumo de combustible, consumo de neumáticos, repuestos, lubricantes y salarios. [2]

Debido a los grandes avances tecnológicos y los esfuerzos realizados por la compañía en incorporar nuevas tecnologías a la industria minera que permitan mejores resultados, es que esta faena minera en estudio ha operado desde sus inicios con una flota de camiones 100% autónoma, siendo la primera mina a rajo abierto a nivel mundial en implementar esta tecnología, sin embargo en los inicios, no resultaba posible cuantificar sus beneficios o dificultades de operar debido a que no se contaba con antecedentes reales en cuanto a costos y parámetros operacionales. Por este motivo el presente estudio busca comparar los costos y parámetros operacionales que significa trabajar con camiones convencionales vs camiones autónomos, mediante una evaluación económica.

Objetivos

Objetivo general

El objetivo de este trabajo consistió en realizar un estudio de costos centrada en la operación de transporte de mineral, la cual tiene la particularidad de ejecutarse mediante camiones que operan de manera autónoma controlados por un software. Para esto, se evaluará la utilización de camiones autónomos v/s convencionales, mediante un indicador económico conocido como valor actual de costos.

Objetivos específicos

- Identificar los principales costos incurridos en el transporte de minerales para poder operar con un sistema de camiones autónomos o un sistema de camiones convencionales.
- Identificar y comparar los parámetros operacionales de camiones autónomos y camiones convencionales
- Determinar la cantidad de camiones que deben componer la flota de transporte autónoma y convencional para cumplir con la producción del rajo.
- Definir cuál es el costo de transporte en USD/ton en cada situación.
- Calcular el valor actual de costos (VAC) que se tendría en la faena en el periodo 2020 a 2027, tanto si se utiliza una flota de camiones autónomos o una flota de camiones convencionales.

Metodología de trabajo

La metodología que se utilizó para el desarrollo de este estudio son los siguientes:

La Recopilación de parámetros operacionales: consistió en recopilar información asociada a los parámetros operacionales de camiones autónomos y camiones convencionales, dicha información fue obtenida del software Intellimine Reporting para los camiones autónomos y para los camiones convencionales mediante benchmarking e información tomada de datos de literatura de mineras detalladas en bibliografía, esta recopilación de datos se logra tomando en cuenta todos los parámetros necesarios como la de gastos, esta etapa consistió en recopilar información económica de camiones autónomos y camiones convencionales para comprender cuales son los gastos más importantes para cada tipo de camión, se toma en cuenta otro parámetros relevantes como la determinación de flotas de transporte y se calculó la cantidad de camiones necesarios que deben componer la flota de transporte autónomo y la flota convencional para cumplir con los requerimientos de producción, esto por sí solo no es viable sin el análisis del cálculo de los gastos, para ello se calcularon los gastos asociados a flota de transporte autónomo y convencional en el periodo 2020 a 2027, una vez obtenido se realiza la

determinación de los costos y se calculó el costo USD/ton de cada una de las flotas a lo largo del periodo 2020 a 2027, creando un análisis de riesgo utilizando una simulación se calculó el valor esperado del VAC de cada flota según el comportamiento de los parámetros operacionales ajustados a una distribución de probabilidad mediante el software @Risk. Con toda esta metodología de trabajo se puede obtener datos cuantitativos que reflejan la conveniencia tangible en operación, costos y operación los que son detallados en la conclusión expuesta y detallada.

Alcances

El presente estudio, tiene como alcance, determinar cuál es el método de transporte más rentable económicamente para la mina en estudio, con objeto de cumplir con los requerimientos de producción del plan de negocio y desarrollo periodo 2020 hasta el año 2027.

Es importante mencionar, que en este estudio se cuenta con la información histórica del método de transporte autónomo, tanto en parámetros operacionales como los gastos incurridos por el método de transporte, ya que es el utilizado actualmente en la faena estudiada.

2 ANTECEDENTES

Antecedentes de la empresa

La faena en la cual se realizó el presente estudio forma parte de una empresa estatal del área de la minería chilena, la cual está orientada a la exploración, explotación, procesamiento y posterior comercialización de los recursos existentes en la faena, siendo los principales productos obtenidos en ella el cobre refinado y sus subproductos.

Dentro de los productos comercializados por la empresa destaca principalmente:

- Cátodos de cobre grado A
- Concentrado de cobre
- Calcina de cobre
- Molibdeno
- Plata
- Barros anódicos
- Ácido sulfúrico
- Alambrón

Los productos anteriormente mencionados son comercializados en todo el mundo, donde el principal comprador es Asia seguido en un menor porcentaje por países europeos y Sudamérica. Actualmente la empresa está conformada por 8 centros de trabajo distribuidos a lo largo de Chile. Esta memoria ha sido desarrollada en uno de estos 8 centros de trabajo.

Descripción de la faena en estudio

Esta faena minera opera el yacimiento en la región de Antofagasta, en la comuna de Sierra Gorda, ubicada aproximadamente a 120 kilómetros al suroeste de Calama a una altura de 2660 metros sobre el nivel del mar.

El acceso principal está situado en el km 13 de la ruta B-23 que conecta a Calama con San Pedro de Atacama. También resulta posible acceder desde Antofagasta, por la ruta 5 a Baquedano, y posteriormente por el camino B-385. En el km 100 de dicho camino, se empalma hacia el norte para dar acceso en 20 kilómetros a la faena minera.



Figura 2 - Ubicación geográfica de la faena en estudio.
Fuente: Google maps

El yacimiento explotado por la compañía minera corresponde a un pórfido cuprífero, el cual cuenta con una zona supérgena, y presenta como mineralización:

- Atacamita
- Arcillas con cobre
- Crisocola
- Óxidos negros

De las mineralizaciones anteriormente mencionadas la especie dominante corresponde a la crisocola. Por otro lado, el yacimiento también presenta una zona hipógena con minerales sulfurados de cobre y hierro.

La faena comenzó su producción en el año 2008, con una vida útil de 15 años, con reservas de 620 millones de toneladas de minerales oxidados cuya ley media es de 0,41% de cobre total y una ley de corte planificada de 0,20%.

Dentro de las principales características que destacan a esta faena minera es que en el año 2007 comenzó la puesta en marcha de la tecnología de transporte autónomo AHS, de sus siglas en inglés Autonomous Haulage System. Ya en el año 2008 comenzó a operar con una flota compuesta por 18 camiones KOMATSU 930E-4AT, la cual opera desde entonces de manera 100% autónoma.

En el año 2010 se decidió realizar una pausa al sistema autónomo y operar la flota de manera convencional con un operador a bordo, con el fin de implementar una mejora al sistema. Luego en el año 2011 se retoma la operación autónoma de manera parcial y se firma un acta de compromisos con Modular Mining Systems, en la cual quedan especificados los criterios de evaluación de la tecnología y las metas que se deben alcanzar con este desarrollo tecnológico. En el año 2012 se vuelve a operar con una flota 100% autónoma, donde se registró un aumento en los indicadores de desempeño, los cuales estaban por sobre el desempeño acordado [3].

En el año 2018 esta faena produjo 107.247 toneladas métricas de cobre fino.

En cuanto a equidad de género, la empresa destaca por ser la empresa minera en Chile que posee el mayor porcentaje de dotación femenina, alcanzando un 20%, tanto en áreas administrativas como productivas.

Descripción del proceso productivo

El proceso productivo comienza con la extracción del mineral, lo cual se realiza mediante perforación, tronadura, carguío del mineral y posteriormente el transporte desde el interior del rajo a las distintas zonas de descarga, las cuales pueden ser: chancador, botadero o stock pile. Luego de que el mineral pasa por el chancador primario, es enviado por correas a los chancadores secundarios y posteriormente a los chancadores terciarios. Una vez finalizada la reducción de tamaño mediante los chancadores, se envía el mineral a curado en tambores acidificadores. Luego de la etapa de aglomeración el mineral se dispone en pilas dinámicas, de las cuales se obtiene una solución rica en cobre la cual es enviada a la planta de procesamiento donde se realiza la extracción por solventes (SX), dando origen a un electrolito rico en cobre el cual finalmente es enviado a la

planta de electro obtención (EW) y así obtener cátodos de cobre, que son comercializados al mercado exterior.

En la Figura 3, se observa un diagrama del proceso productivo de la faena minera en estudio.

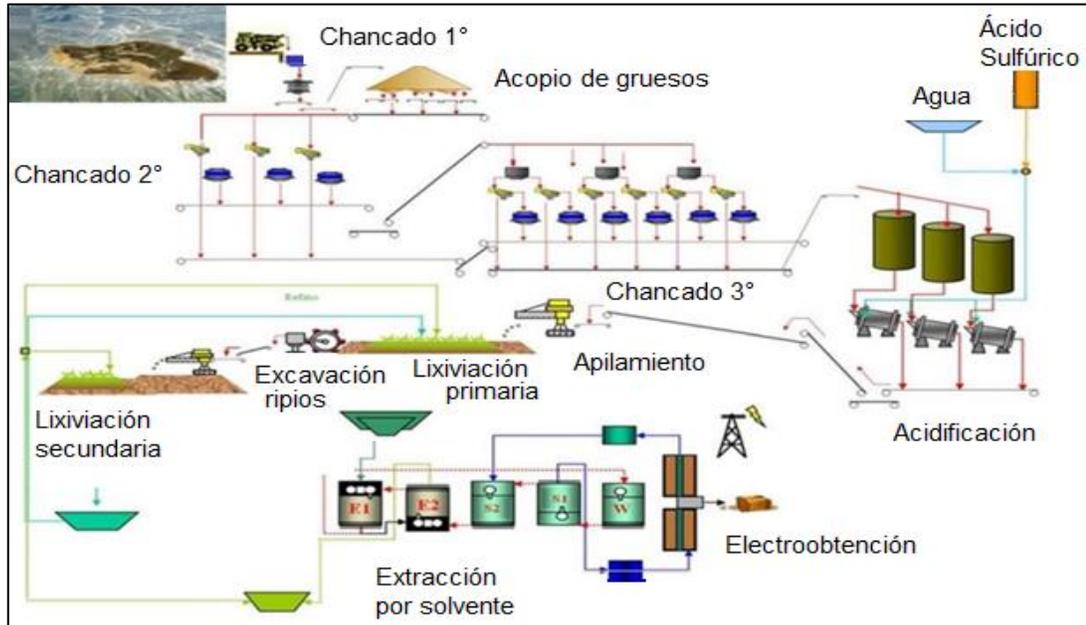


Figura 3 - Proceso productivo de la faena en estudio.
Fuente: Dueño del proyecto no autoriza nombre de la fuente.

Camión de extracción (CAEX)

Son equipos de producción cuya función es transportar el material, desde el rajo hacia el chancador, botaderos o stock, dependiendo el tipo de material que se transporta. Son equipos de grandes dimensiones con velocidades de transporte variadas, las que dependen de su carga (vacío o cargado) y/o del tramo (horizontal o en pendiente, ya sea positiva o negativa). Estos equipos transitan por las rampas del rajo y a medida que avanza la operación se van enfrentando a distancias de transporte cada vez más largas, disminuyendo su rendimiento, lo que implica un mayor requerimiento en el número de camiones operativos para cumplir con la producción requerida.

Esta faena minera cuenta actualmente con 18 camiones de extracción (CAEX), de la marca KOMATSU modelo 930E-4 con factores de carga de 295 ton. Su vida operacional ronda las 90.000 horas y el costo de adquisición es cercano a los 5 MUSD. Dentro de las características del camión KOMATSU 930e-4 se encuentran:

- Equipado con sistema autónomo.
- Motor diésel de 16 cilindros.
- Tiene un consumo de combustible aproximado de 207 [l/h].

- Estanque con capacidad para 4.543 [l] de combustible.
- Peso bruto de 498 [t].
- Potencia de volante de 2.550 [HP].

En la Figura 4 se observan las dimensiones del camión Komatsu 930E-4, utilizado en esta faena.

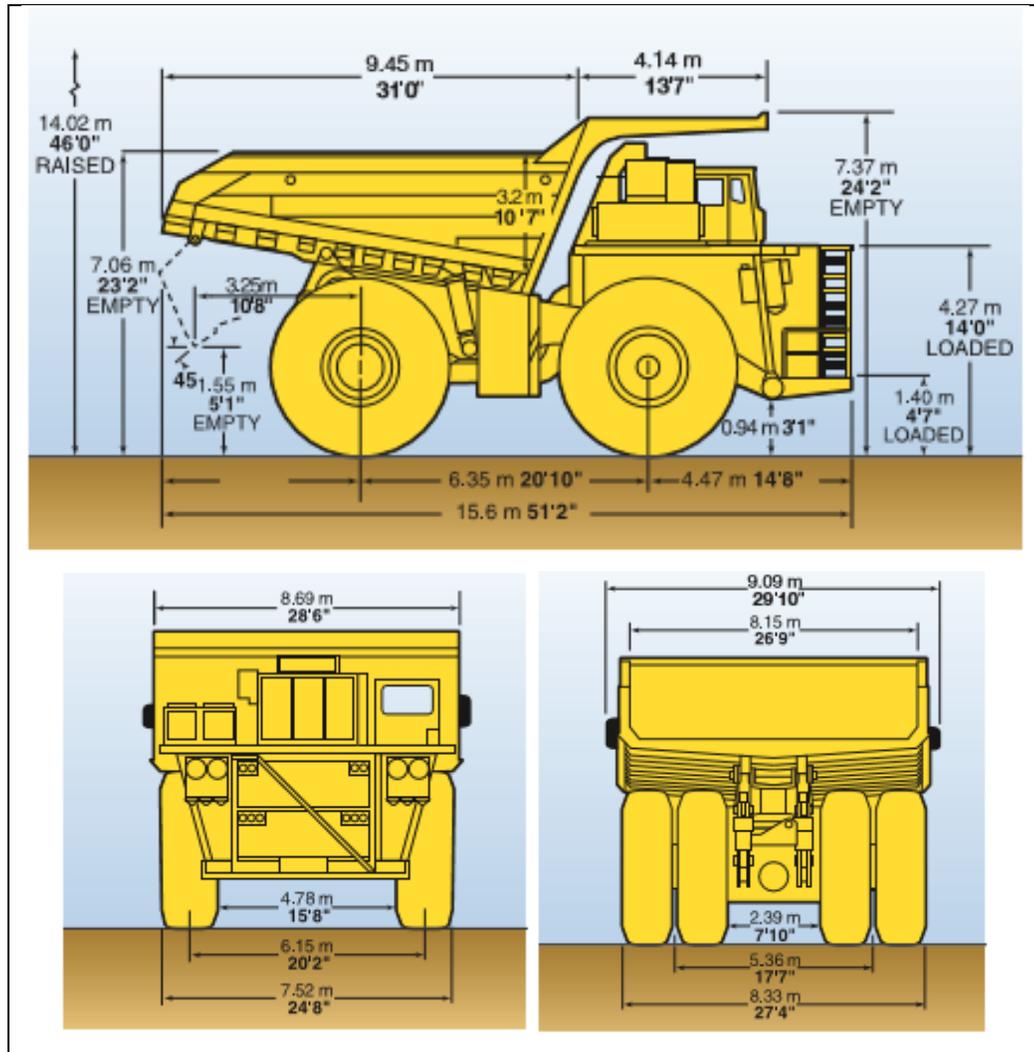


Figura 4 - Vista general de dimensiones camión KOMATSU 930E-4

Fuente: Catalogo Komatsu 930e-4.

Automatización de camiones mineros en minas a rajo abierto

Hoy en día todo tipo de industria busca lograr altos niveles de automatización, tanto por temas de seguridad como también para aumentar la productividad y reducir los costos. En el ámbito de la minería se ha buscado desde los años 60's lograr avances en la automatización de los equipos

mineros. Ya en el año 2008 la empresa Komatsu comenzó a operar con camiones autónomos en la mina en estudio.

Un camión autónomo se define como un equipo de transporte equipado con:

- Red de comunicación inalámbrica.
- Sensores de navegación y sistema de detección de obstáculos.
- Servidor de procesamiento de datos de sensores locales a bordo para aceleración.
- Hardware de control y coordinación de dirección y freno.
- Sistema GPS que permite informar la ubicación en tiempo real del camión y,
- Software para el control local y de supervisión.

Para que los camiones autónomos puedan operar de manera correcta se requiere de un software y hardware necesario para poder controlar la flota. En este sentido distintas empresas han desarrollado sistemas de transporte autónomo con sus respectivos softwares de control, entre estas empresas se encuentran:

- Komatsu utiliza el sistema de control de Modular Mining Systems.
- Caterpillar utiliza sistema de control Minestar.
- Hitachi utiliza sistema de control Wenco International Mining Systems.

Las estadísticas operacionales para estos proveedores y sus socios en minería se pueden ver en la Tabla 1 – Implementación actual de camiones autónomos en minas a rajo abierto a nivel mundial [2].

Tabla 1 - Implementación actual de camiones autónomos a nivel mundial [2].
Fuente: Equipment Replacement Analysis of Manual Trucks with Autonomous Truck Technology in Open Pit Mines

Start Year	Mining Company	Mine Site	Location	Manufacturer	Truck Type	Capacity	Number
2008	Codelco	Gabriela	Chile	Komatsu	930E-AT	320 tons	17
2008	Rio Tinto	West Angelas	Australia	Komatsu	930E-AT	320 tons	5
2011	BHP	Navajo Mine	New	Caterpillar	Cat 793F	250 tons	3
2012	Rio Tinto	Yandicoogina	Australia	Komatsu	930E-AT	320 tons	22
2012	Rio Tinto	Hope Downs	Australia	Komatsu	930E-AT	320 tons	19
2012	Fortescue	Solomon	Australia	Caterpillar	Cat 793F	250 tons	54
2013	Rio Tinto	Nammuldi	Australia	Komatsu	930E-AT	320 tons	30
2014	BHP	Jimblebar	Australia	Caterpillar	Cat 793F	250 tons	18
2017	Stanwell	Meandu	Queensland	Hitachi	EH5000AC-3	326 tons	3

La decisión de automatizar una flota de camiones significa una gran inversión, ya que además del costo de la maquinaria, requiere capacitar al personal, infraestructura de apoyo y sistemas de información lo que significa un cambio cultural profundo a nivel organizacional, por lo que no todas las empresas mineras optan por esta nueva forma de trabajar perdiendo en consecuencia, beneficios

operacionales tales como la seguridad a las personas ya que elimina la presencia del operario en el sitio de la faena al comandarse desde grandes distancias. Otro beneficio importante es el aumento en la utilización de los equipos ya que están operativos las 24 horas al no detenerse para descanso ni cambios de turno.

Otros beneficios que se suman a lo anterior están representados por la disminución en el consumo de combustible que bordea entre un 5% a 7% y desgaste de neumáticos que llega al 7% de ahorro [4].

Sistema de transporte autónomo

El AHS o Autonomous Haulage System, corresponde a uno de los mayores desarrollos tecnológicos, el cual integra tres sistemas que trabajan de manera interrelacionada entre sí para una mejor gestión y administración de las flotas de perforación, carguío y transporte, las cuales desarrollan las actividades de optimización de los activos además de permitir el seguimiento y reportabilidad de los indicadores de cada una de estas flotas.

Los sistemas con los que opera el sistema autónomo son:

- Frontrunner: este software tiene como función definir y controlar la operación autónoma, utilizando parámetros de configuración y múltiples capas de seguridad, los cuales permiten una interacción segura entre los equipos autónomos y los equipos tripulados con el entorno de la operación minera al interior de la zona autónoma.
- Dispatch: este software tiene como objetivo optimizar la producción de la mina utilizando información en tiempo real, permitiendo aumentar la productividad y reducir costos operacionales, además de permitir el seguimiento en tiempo real de los indicadores de las distintas flotas que se encuentran al interior de la mina [5]. El sistema dispatch busca las mejores opciones de ruta, para luego enviar a los equipos de transporte a sus destinos optimizando los tiempos de transporte, para ello utiliza un modelo basado en tres algoritmos:
 - Modelo mejor ruta
 - Modelo de programación lineal
 - Modelo de programación dinámica
- Provisión: es un sistema de navegación asistida de alta precisión del modelo de la mina, el cual es utilizado por los equipos de carguío, donde se definen los polígonos de extracción de material; también es utilizado por los equipos de perforación, cuya función es apoyar la navegación dentro de los polígonos de extracción que definen los patios de perforación y monitorea el estado de los elementos de desgaste de estos equipos.

Componentes del Sistema Autónomo

Para hacer posible el correcto funcionamiento del sistema autónomo este cuenta con distintos componentes, para ello existe una central autónoma desde donde se dirige y monitorea la operación, la cual al igual que los equipos mineros que desarrollan sus actividades al interior de la mina deben estar equipados con ciertos componentes que permitan asegurar la interacción entre persona / equipo, equipo / equipo, además de asegurar la continuidad operacional esencial en una faena minera [3].

Central autónoma

La central autónoma corresponde al espacio físico desde donde se monitorean los camiones y el funcionamiento de los quipos al interior de la mina, dicha central está compuesta por un conjunto de servidores, red de comunicación y GPS, los cuales permiten comunicarse de manera bidireccional y en tiempo real con los computadores de campo instalados en los equipos que desarrollan sus actividades al interior de la zona autónoma.

Computador de Campo

Todos los equipos que se encuentran al interior de la mina deben estar equipados con el sistema autónomo, para ello deben contar con un computador de campo (hardware) modelo PTX-C (véase Figura 5 – Computador de campo modelo PTX-C), cuya función es permitir interactuar entre los camiones de extracción en estado autónomo y los distintos equipos tripulados dentro de la mina equipados con sistema autónomo.

Cada equipo debe contar con un botón de emergencia, el cual al ser accionado detiene toda la flota de transporte autónoma.



Figura 5 - Computador de campo modelo PTX-C
Fuente: Modular, 2016

Antena y receptor GPS

Cada camión de extracción autónomo debe estar equipado con una antena y receptor GPS, el cual permite conocer la posición en tiempo real del equipo al interior de la zona autónoma. Debido a la importancia que tienen estos componentes es un sistema de alta precisión dado que es una condición de seguridad básica con la que debe contar los equipos, por este motivo al no disponer con buena calidad de señal y georreferencia, el sistema detendrá la flota.

Radio Ethernet

Para que los equipos puedan contar con una alta precisión satelital, estos deben estar equipados con una radio Ethernet, la cual permite transmitir grandes paquetes de datos hacia la central autónoma, permitiendo a los servidores generar los algoritmos que controlan a los camiones de extracción para enviarlos a sus destinos a través de las rutas definidas y permitir la interacción con los demás equipos al interior de la zona autónoma.

Sensores OEM

Corresponden a los sensores con los cuales debe estar equipado el camión de extracción, que permiten monitorear los signos vitales del camión, controlar parámetros operacionales o sus estados de falla.

Red inalámbrica de comunicación

Corresponde a una red de alta velocidad, la cual permite el intercambio de paquetes de datos entre los equipos de campo y el computador central del servidor.

Esta red inalámbrica a su vez tiene distintos componentes, los cuales son:

- **Ground Station:** cada equipo que cuente con el sistema autónomo debe estar equipado por esta antena (véase Figura 6 – Antena ground station). Su función es permitir la georreferenciación de los equipos y a su vez aplica correcciones a las diferencias de ubicación de alta precisión del sistema autónomo, lo que permite conocer la ubicación en tiempo real de los camiones autónomos y equipos al interior de la mina con precisión milimétrica.



Figura 6 - Antena ground station
Fuente: KOMATSU, 2017

- Mobile Acces Point: son carros móviles cuya función es permitir flexibilizar la cobertura de los puntos de acceso de red, con el fin de que no existan zonas al interior de la mina que no cuenten con cobertura para el sistema autónomo permitiendo una alta calidad de transacción de datos sin que exista pérdida de estos. Conforme avanza el desarrollo de la mina estos mobile acces point son reubicados al interior de la mina asegurando la cobertura (véase Figura 7 – Mobile acces point).



Figura 7 - Mobile acces point
Fuente: KOMATSU, 2017

- Acces Point: corresponden a puntos de acceso fijos dentro de la red, los cuales se enlazan con los mobile acces point para repetir y retransmitir los paquetes de datos entre equipos y servidores. Estos cuentan con un componente P2P y un componente CISCO 5GHz y 2.4 GHz. A continuación, en Figura 8 y Figura 9, se muestran estos componentes:



Figura 8 - Componente P2P de un Acces Point
Fuente: KOMATSU, 2017



Figura 9 - Componente CISCO 5 GHz y 2.4 GHz de un Acces Point
Fuente: KOMATSU, 2017

Componentes de seguridad

Con el objetivo de permitir una interacción segura entre el personal que ingresa al área autónoma, se debe capacitar al personal para que sea capaz de distinguir entre los siguientes componentes de seguridad que presenta el sistema autónomo:

- **Luces o Balizas:** cada camión cuenta con tres balizas o luces, ubicados tanto en la parte frontal del camión como en la parte trasera. El color de la luz encendida indica el estado de operación en el que se encuentra el camión, como se muestra en la Figura 10 – Luces modales de operación autónoma.

Autónomo		Camión no tripulado
Manual		Operador se encuentra arriba del equipo
Excepción		Camión se encuentra con una falla mecánica
Suspensión		Operador puede subir o bajar del CAEX para cambiar de modo
Aislado		Equipo se encuentra apagado y puede estar en Tiedown

Figura 10 - Luces modales de operación autónoma.
Fuente: Análisis sistema de transporte autónomo (AHS) en División Gabriela Mistral, 2016.

- Sistema de permisos: corresponde a un área de avance del camión para evitar colisiones entre un camión y un equipo tripulado, el cual se acciona en el momento en que un camión autónomo detecta que un equipo se acerca demasiado, enviando un pitido a CGC del equipo móvil para alertar al conductor de este.
 - Curso: corresponde a una colección de puntos provenientes de datos gps los cuales definen el punto central del camión autónomo y también la velocidad en un camino dado, o en cualquier área de carga y descarga. Los cursos también permiten que el camión sepa donde parar de forma precisa para poder cargar y descargar.
- Interacción manual-Modo tránsito, paso y estacionamiento: Corresponde al modo de interacción entre el camión autónomo y un vehículo equipado con el sistema Frontrunner. Los modos de interacción son los siguientes:
 - Burbuja de tránsito: burbuja de color verde, con radio de 50m, la cual detiene el paso de camiones. El camión comienza a detenerse antes de la burbuja.
 - Burbuja de paso: Burbuja amarilla con radio de 50 m y permite que el camión se desplace a medida que la burbuja también avanza. Si el camión va por la pista contrario solo reduce su velocidad.
 - Burbuja de estacionamiento: Burbuja roja de radio 5m. En este caso la burbuja disminuye su tamaño para que el camión circule sin disminuir su velocidad
 - Sobre de seguridad: Burbuja roja cuyo radio depende del equipo (5m aprox.). Es la última barrera del equipo y depende del GPS.
- Interacción manual – Básica: corresponde a un modo de interacción utilizado para permitir el ingreso al área AT a vehículos que no se encuentran equipados con el sistema autónomo y corresponde al modo “Escolta”, el cual permite proteger equipos hasta un radio de 200m que generalmente son generadas por la EMV mediante el uso de la consola grafica CGC, la cual genera un cumulo de burbujas verdes de tránsito
 - Burbuja de escolta: unión de burbujas de tránsito que, al entrar en contacto con un AHT, provocan que este comience a disminuir su velocidad hasta detenerse. Cuando la escolta se aleja y las burbujas dejan de tener contacto con AHT este sigue su curso nuevamente.

- Sistema de detección de colisión (CDS): Corresponde a una capa de seguridad que poseen todos los equipos que tienen incorporado el sistema autónomo, cuya función es controlar riesgos de colisión al interior del área autónoma, para ello genera una envolvente de seguridad la cual rodea a cada equipo con sistema AHS.

El sistema de detección de colisiones está compuesto por:

- Sobre de seguridad: es la última barrera del equipo que alerta del riesgo de colisión, permitiendo una interacción segura entre los equipos al interior de la zona autónoma. A continuación, se visualiza como el sistema Frontrunner representa el sobre de seguridad:

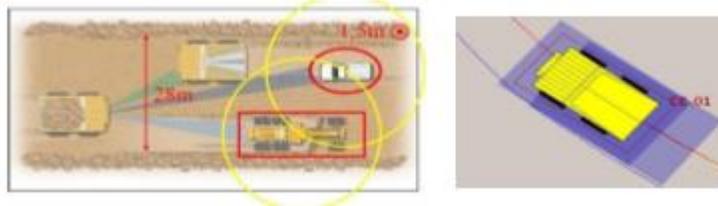


Figura 11 - Sobre de seguridad.

Fuente: Análisis sistema de transporte autónomo (AHS) en División Gabriela Mistral, 2016.

- Sistema de permisos: corresponde al área de avance que toma el camión autónomo para evitar colisionar con otro camión o un equipo tripulado. Si un equipo tripulado se acerca demasiado se envía un pitido a la consola grafica de color (CGC) del equipo para alertar al conductor.
- Sistema de detección de obstáculos (ODS): es un sistema que se basa en el radar, cuya función es detectar obstáculos en la ruta del camión, sin embargo, no puede detectar esquina ciega, curva cerrada, pendiente, cima de colina. Por otro lado, el ODS también puede arrojar falsas alarmas por pequeñas rocas, estar muy cerca de la pared del banco,

caminos irregulares, pendientes. A continuación, se ilustran en la Figura 12 – Falsas alarmas de sistema de detección de obstáculos (ODS):

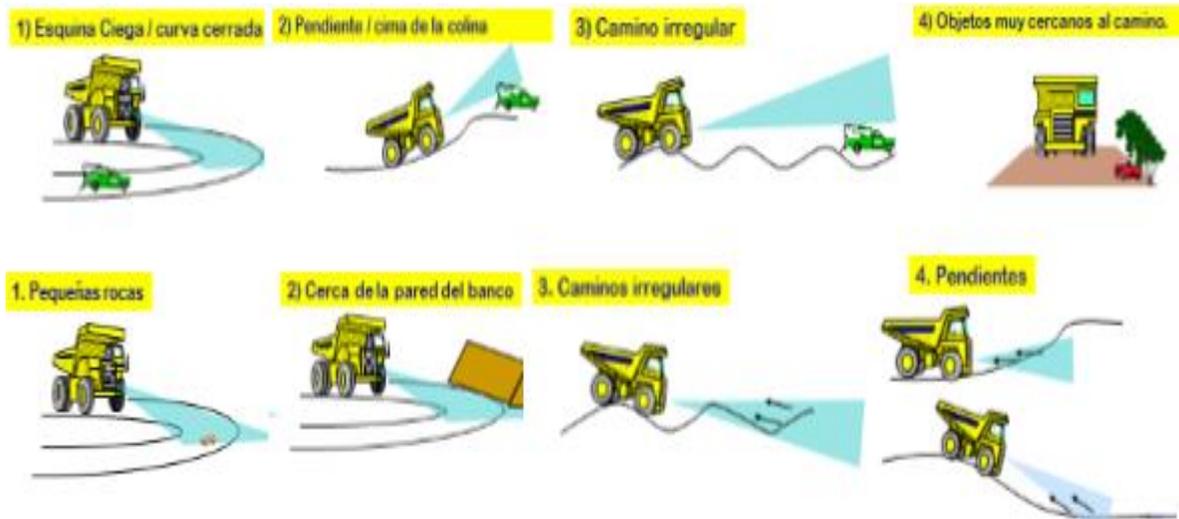


Figura 12 - Falsas alarmas de sistema de detección de obstáculos (ODS).

Fuente: Análisis sistema de transporte autónomo (AHS) en División Gabriela Mistral, 2016.

Cuando el camión detecta un obstáculo, cambia automáticamente a modo excepción, por lo que una persona de operación debe verificar y confirmar el obstáculo, removiéndolo si es que existe y cambiando el modo del camión para continuar con el funcionamiento de este.

- Barreras virtuales/obstáculos: estos sistemas de barreras permiten al operador de un vehículo con sistema AHS, crear e ingresar obstáculos virtuales al área AT, para brindar protección y una interacción segura con AHT.
 - Obstáculo general: tiene forma circular y de color rojo
 - Obstáculo normal: Surveyed (obstáculo de conducción y variable)
 - Obstáculo KOA: Surveyed// para moto niveladoras cuando requieren limpiar
 - Obstáculo de cable: Surveyed// para cuidar cables de equipos eléctricos, dibujados con EMV o el mismo palero.
- Botón de emergencia: corresponde a un botón rojo para emergencia operacional que al presionarlo detiene instantáneamente el funcionamiento de los camiones autónomos. Existe botón de emergencia en AHT, equipos auxiliares, controlador central, chancado.

Marco teórico

Modelo de ASARCO

En la operación minera resulta necesario definir los tiempos de trabajo de los equipos. Esto debido a que el equipo no se encuentra trabajando de manera continua, sino que existen tiempos en los que está en mantención, ya sea programada o no, puede estar sin operador o simplemente no requiere ser utilizado. Por este motivo en la empresa minera existe un sistema convencional, el cual permite representar estos tiempos, denominado modelo de ASARCO (debido a la institución pionera en esta metodología, American Smelting & Refining Co.) [6]. A continuación, se presenta la metodología de ASARCO en la Figura 13.



Figura 13 - Modelo de ASARCO.

Fuente: Manual DGM-MN-009 Administración y Operación del Sistema Autónomo v 2.0.

- Tiempo nominal: Corresponde al tiempo total del año calendario, todos los eventos ocurren dentro de esta categoría de tiempo.
- Tiempo disponible: Es el tiempo que un equipo se encuentra habilitado y disponible para cumplir y desempeñar la función para la cual fue adquirido por la compañía, sin embargo, este puede o no ser utilizado.
- Fuera de servicio: El equipo no se encuentra en condiciones para operar. El equipo puede estar fuera de servicio por distintas razones, a continuación, se muestran dichos motivos por los que un equipo se encuentra fuera de servicio:
 - Programado: tiempo definido para mantenciones programadas, las cuales resultan ser necesarias para cada unidad productiva
 - No programado: tiempo en el cual el equipo no se encuentra disponible para operación, debido a fallas propias e inherentes a la unidad

- Excluido: corresponde al tiempo donde el equipo no se encuentra disponible para la operación debido a fallas no propias del equipo, por tecnologías de terceros y/o accidentes/incidentes
- Tiempo operativo: Corresponde al tiempo en que el equipo se encuentra a cargo de su operador, habilitado para cumplir con su función para la cual fue diseñado y adquirido por la empresa.
- Reservas: El equipo se encuentra disponible para ser utilizado en la operación, pero no es requerido, ya sea por planificación o por algún otro motivo, como falta de operador, falta de capacidad de un equipo complementario o instalaciones y/o fuerza mayor como condiciones climáticas, sismos, movilizaciones sociales, huelgas y feriados pactados.
- Tiempo efectivo: Corresponde al tiempo en que el equipo se encuentra desarrollando las actividades específicas de diseño para las cuales ha sido adquirido por la empresa.
- Pérdidas Operacionales: Es el tiempo en que el equipo no puede cumplir con su función operacional productiva debido a ineficiencias presentes e inherentes a los ciclos operativos y está compuesta por:
 - Camión espera en equipo de carguío
 - Camión espera en descarga
 - Pala espera por camión
 - Chancado espera por camión
- Demoras: El equipo se encuentra esperando, por lo cual no puede desempeñar su función. Las demoras se clasifican en dos tipos:
 - Demoras programadas: Ineficiencias propias del proceso productivo de las cuales se conoce, o se encuentra establecida, su duración máxima de tal forma que su adecuado control permitan alcanzar las metas de producción y costos.
 - Demoras no programadas: Ineficiencias del proceso productivo de las cuales no se conoce o no se tiene certeza de su ocurrencia tanto en el espacio de tiempo como su duración.

A partir de los tiempos definidos en el modelo de ASARCO, se definen ciertos indicadores operacionales referentes a los tiempos de los distintos equipos mineros, los que indican la porción del tiempo que estos están disponibles para operar, porción del tiempo que son operados o porción de tiempo que realmente se encuentran realizando su trabajo. Los indicadores más importantes y utilizados en este trabajo se muestran a continuación:

- Disponibilidad física: la disponibilidad física es un indicador de rendimiento y representa la porción de tiempo nominal que el equipo está disponible para ser operado. Se tiene que la disponibilidad de un equipo se calcula de la siguiente manera

$$DF(\%) = \frac{\text{Tiempo nominal} - (\text{Mant. Programada} + \text{Mant. No Programada})}{\text{Tiempo Nominal}} \times 100 \quad (1)$$

- Uso operativo: corresponde a la porción del tiempo disponible en el cual el equipo se encuentra funcionando.

$$UO(\%) = \frac{\text{Tiempo Operativo}}{\text{Tiempo Disponible}} \times 100 \quad (2)$$

- Utilización efectiva: su función es indicar la porción del tiempo total, en la cual el equipo está funcionando de manera productiva y por ello aportado a la producción de la mina.

$$UE(\%) = \frac{\text{Tiempo Efectivo}}{\text{Tiempo Nominal}} \times 100 \quad (3)$$

- UEBD: la utilización efectiva en base al tiempo disponible corresponde a la porción del tiempo disponible del equipo para ser operado y que el equipo realmente se encuentra desarrollando las actividades específicas para los cuales ha sido adquirido por la organización. Esta variable se presenta como porcentaje.

$$UEBD(\%) = \frac{\text{Tiempo efectivo}}{\text{Tiempo disponible}} \times 100 \quad (4)$$

- Distancia equivalente: la distancia equivalente es un indicador que considera tanto la distancia horizontal que recorren los CAEX como la distancia en pendiente, además de un factor de ajuste asociado a cada operación. Este indicador permite comparar dos escenarios que presentan distintas pendientes y distancias medias.

$$Dist_{eq} = DistMedia_{carg} \times \%Hz + Fac \times DistMedia_{crg} \times \%Vertical \quad (5)$$

- Rendimiento Neumáticos: el rendimiento de neumáticos de los CAEX se mide a través del horómetro y corresponde a las horas de duración del neumático antes de ser dados de baja. Se tiene que la vida promedio de neumáticos en camiones autónomos está aproximadamente en 9000 horas [7].

Para maximizar su vida útil se recomienda realizar rotación de neumáticos desde posiciones delanteras a posiciones traseras, cuando el neumático ha cumplido aproximadamente un tercio de su vida útil programada.

OPEX

Los OPEX corresponden a los costos en que se incurren de manera continua para poder mantener en funcionamiento el negocio, es decir, en este caso hace referencia a los costos que se deben incurrir en mantención de equipos, consumo de combustible, neumáticos y todos aquellos materiales necesarios para el funcionamiento del negocio.

En este caso solo se consideran los OPEX asociados al funcionamiento del camión, los cuales son principalmente mantención, cambio de neumáticos, pago a operadores (sistema convencional), servicios de terceros y consumo de combustible.

Tasa de descuento e inflación

La tasa de descuento corresponde a la tasa utilizada para descontar los flujos futuros de efectivo para traer los valores a valor presente neto. Por otro lado, la tasa de inflación corresponde al incremento anual porcentual del nivel general de precios, comúnmente se mide a través del índice de precios al consumidor (IPC). En este estudio en particular la tasa de descuento utilizada es de 8%, la cual es definida por la empresa.

Simulación

La simulación consiste en imitar la operación de un proceso, donde se crea una historia artificial, a partir de la cual se pueden obtener conclusiones acerca del sistema que se está representando [8].

Dentro de los modelos de simulación existen distintos tipos, como pueden ser modelos físicos, en el cual se simulan escenarios concretos, o pueden ser modelos matemáticos en los cuales se utilizan ecuaciones matemáticas asociados a parámetros de entrada para entregar una salida como resultado. Los modelos matemáticos se pueden clasificar en

-Modelos continuos: en este tipo de modelos, la relación entre las variables relevantes se define por medio de ecuaciones diferenciales, debido a que estas permiten conocer el comportamiento de la variable en el tiempo.

-Modelos discretos: estos modelos representan el comportamiento de lo que se quiere calcular mediante ecuaciones que son evaluadas en un punto determinado.

Los modelos también se pueden clasificar en modelos dinámicos o en modelos estáticos, donde los primeros el estado del sistema cambia con el paso del tiempo, mientras que los modelos estáticos representan un resultado bajo condiciones estáticas. Los modelos también se pueden clasificar en modelos determinísticos y en modelos probabilísticos o estocásticos, donde los primeros se refieren a relaciones constantes entre los cambios de las variables del modelo, mientras que los modelos probabilísticos involucran relaciones con valores aleatorios de las variables, los cuales están asociados a una distribución de probabilidad [9].

En este estudio se realizó una simulación de Montecarlo, la cual recoge repetidamente valores de una distribución de probabilidad previamente definida por el usuario para las variables del modelo, a partir de las cuales se generan múltiples escenarios como resultado, entregando una banda de valores probables [10].

Estadística

En estadística se define como variable aleatoria aquella cuyo comportamiento cumple con las siguientes reglas de distribución de probabilidad:

- La suma de las probabilidades asociadas a todos los valores posibles de la variable aleatoria x es uno.
- La probabilidad de que un posible valor de la variable aleatoria x se presente siempre es mayor que o igual a cero.
- El valor esperado de la distribución de la variable aleatoria es la media de la misma, la cual a su vez estima la verdadera media de la población.

Los parámetros que definen la distribución de probabilidad de una variable aleatoria pueden obtenerse mediante un estimador no sesgado [9].

Para poder conocer la distribución de las variables a utilizar en un modelo de simulación se realizan pruebas de bondad de ajuste, las cuales determinan si los datos se ajustan a una distribución de probabilidad determinada. Para ello en este trabajo se hace uso de un software complementario con Excel denominado @Risk, el cual muestra tres opciones de estadísticos para hacer el test de ajuste, estos son: Chi-cuadrado, Kolmogorov-Smirnov (K-S) y Anderson Darling (A-D). la elección se basa en comparar estadísticos según el tamaño muestral, donde las pruebas A-D muestran una mejor capacidad de detección del ajuste para muestras pequeñas y medianas [11], además de que algunos autores señalan que esta prueba es la más potente estadísticamente para pruebas basadas en funciones de distribución empíricas [12].

@Risk

Es un software que funciona como complemento en Microsoft Excel, el cual se utiliza para modelar y simular cualquier situación de riesgo tanto en la ingeniería como en cualquier situación donde se requiere tomar una decisión asociada a ciertas variables.

Este modelo opera en una hoja de cálculo Excel donde el usuario define el modelo a simular, para ello se introducen variables de entrada y variables de salida como resultado del modelo. Así el software permite introducir toda la información que se conoce sobre el comportamiento de una variable de entrada y de esta manera realizar un ajuste de distribución de probabilidad, para luego

realizar una cantidad de iteraciones definida por el usuario y entregar como resultado de la variable de salida una banda de valores probables y no un único valor, permitiendo al usuario tomar una decisión conociendo un escenario más amplio del resultado y no solo adoptando una posición optimista o pesimista.

Documento Exhibit

Este documento es actualizado mes a mes y cerrado de manera anual por la compañía minera y posee información sobre la operación, detallando los tonelajes perforados, cargados y transportados, además de sus parámetros operacionales como disponibilidad, utilización efectiva, rendimiento y consumo de combustible o electricidad según el tipo de energía que consume el activo para poder realizar su función para la cual fue adquirido el equipo. Para este trabajo se utilizó el documento exhibit 2019 que abarca los meses de enero a septiembre del presente año.

Documento PND

Este documento es confeccionado cada año por el área de planificación a largo plazo, donde se indican los tonelajes a extraer en los años futuros, los destinos del material a extraer y también los tonelajes cargados por cada equipo de carguío y tonelajes a transportar por los camiones de extracción, como también ciertos indicadores operacionales como disponibilidad y utilización efectiva. En este trabajo se utilizó el documento PND 2019 el cual abarca información de planificación desde el año 2019 al año 2027.

Mantenimiento

Consiste en realizar actividades de carácter mecánico, que peritan el correcto funcionamiento de los equipos mineros, asegurando que estos estén disponibles para operar. Dentro del mantenimiento se distinguen mantenciones programadas, las que están pre establecidas para ser realizadas, y por otro lado las mantenciones no programadas, las cuales deben ser realizadas por qué ocurre una falla en el equipo, la cual se requiere sea corregida.

El área de mantención de los equipos mineros puede estar a cargo de la misma empresa o puede ser encargada a un tercero, en el segundo caso se debe firmar un contrato con la empresa encargada en la cual se establecen las condiciones que se deben cumplir y las actividades con las que se compromete tanto la empresa que solicita el servicio como la empresa prestadora del servicio, además de indicar el costo en el que se debe incurrir por dicha actividad.

Existen distintos tipos de contrato con terceros para realizar la mantención a los equipos.

2.1.1.1 Full MARC:

Este tipo de servicio consiste en mantenimiento integral de los equipos por parte del proponente, incluyendo mano de obra, repuestos, componentes y todo el equipamiento de apoyo

que sea necesario para realizar la prestación del servicio a contratar. Este tipo de servicio considera además entregar en forma directa o mediante subcontratación los siguientes servicios:

- Mantenimiento y reparación de aire acondicionado y cabina
- Lavado de equipos
- Mantenimiento en talleres e infraestructura
- Mantenimiento equipos de apoyo
- Mantenimiento y reparación de neumáticos
- Mantenimiento y reparación de tolvas
- Soldadura especial y estructural
- Mantenimiento y reparación sistema supresor de incendios

2.1.1.2 MARC

El servicio de mantenimiento MARC es un servicio integral de los equipos por parte del Proponente muy similar a Full MARC, excluyendo la entrega en forma directa o mediante subcontratación los servicios de:

- Mantenimiento y reparación de neumáticos
- Mantenimiento y reparación de tolvas
- Soldadura especial y estructural

2.1.1.3 Labor Plus Part

Consiste en un servicio de mantenimiento de equipos que incluye como aporte del contratista, la provisión de mano de obra, planificación y programación, ingeniería, planificación de materiales y repuestos, monitoreo de condiciones, ejecución del mantenimiento, cambio de componentes y todo el equipamiento de apoyo para la prestación del servicio a contratar, excluyendo en esta modalidad la entrega en forma directa o mediante subcontratación los siguientes servicios:

- Mantenimiento y reparación de neumáticos
- Mantenimiento y reparación de tolvas
- Soldadura especial y estructural

3 DESARROLLO

El desarrollo de este trabajo consistió en definir cuál es la opción de transporte más viable económicamente a utilizar en esta empresa, ya sea una flota de camiones autónomos o una flota de camiones convencionales. Lo anterior basándose en datos históricos en cuanto a los costos operacionales en los que incurre cada tipo de transporte, autónomo o convencional, además de los parámetros operacionales reales de cada uno de ellos. Se debe tener en cuenta que en ambos casos se debe cumplir con el tonelaje planificado a extraer del rajo.

Recolección de información de parámetros operacionales de camiones autónomos y camiones convencionales

En esta etapa se buscó definir basándose en datos reales, cuáles son los valores de parámetros operacionales esperados para cada tipo de camión, para luego poder utilizarlos en el cálculo de las flotas de camiones autónomos y camiones convencionales requerida para cumplir el plan de producción de la faena minera en los años siguientes.

Para poder conocer los valores de los indicadores operacionales del camión autónomo se utilizó el software Intellimine Reporting, en el cual se reportan todos los tiempos de las flotas de transporte, previamente definidos en el modelo de ASARCO, a partir de los cuales se calcula la disponibilidad, uso operativo y UEED. De este software se extrajo una base de datos de los años 2018 y 2019 para conocer los parámetros operacionales del camión autónomo.

De la misma manera para definir los parámetros operacionales del camión convencional se buscó en una base de datos de los años 2017 y 2018, la cual muestra los tiempos registrados por una flota de camiones Komatsu 930E-4, definidos en el modelo de ASARCO.

A continuación, se muestran los parámetros de disponibilidad, uso operativo y UEED tanto de camiones autónomos como camiones convencionales obtenidos a partir de las bases de datos.

Disponibilidad

En cuanto a los camiones autónomos, el área de mantención de la faena estima un valor de disponibilidad de 84%, con este valor se debe ser capaz de cumplir con la producción de mineral planificada, dicha información se contrasta con los datos obtenidos del sistema Intellimine Reporting de la disponibilidad asociada de la flota de transporte de los años 2018 y 2019, y por otro lado se obtiene el valor de la disponibilidad a partir de la data histórica de la flota de camiones convencionales de los años 2017 y 2018.

A continuación, en la Figura 14 se muestra la distribución de la disponibilidad de camiones autónomos y en la Figura 15 se muestra la distribución de la disponibilidad de la flota de camiones convencionales.

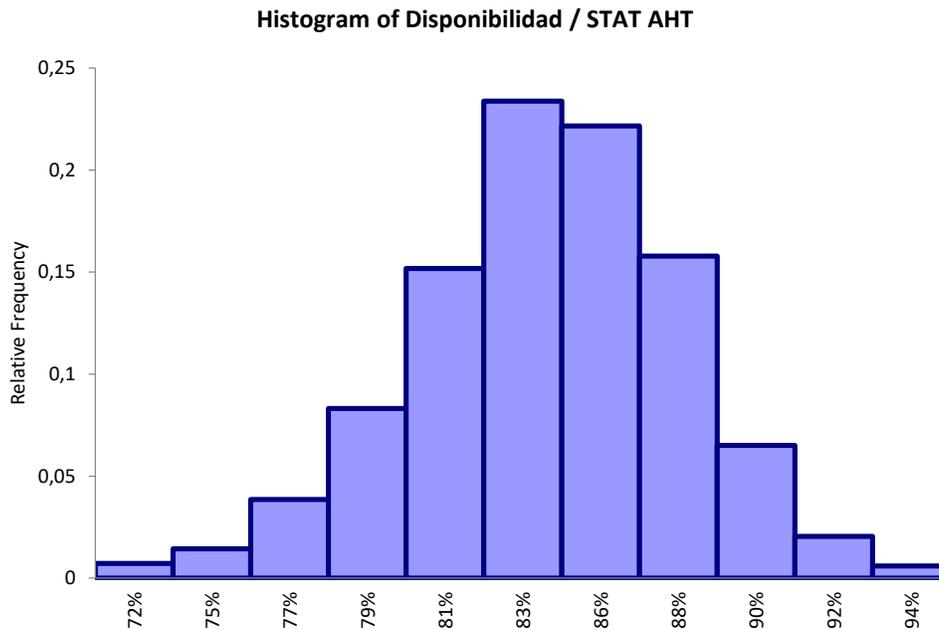


Figura 14 - Histograma de la disponibilidad de la flota de transporte autónoma.
Fuente: Elaboración propia

La Figura 14 - Histograma de la disponibilidad de la flota de transporte, muestra la distribución de la disponibilidad de camiones durante el año 2018 y 2019, se observó que la mayor parte de los datos presentan una disponibilidad entre 81% y 88%, esto debido a que los esfuerzos de la empresa buscan mantener este indicador lo más alto posible, por tanto, se tiene una alta probabilidad de tener sobre 14 camiones de extracción disponibles para transportar material.

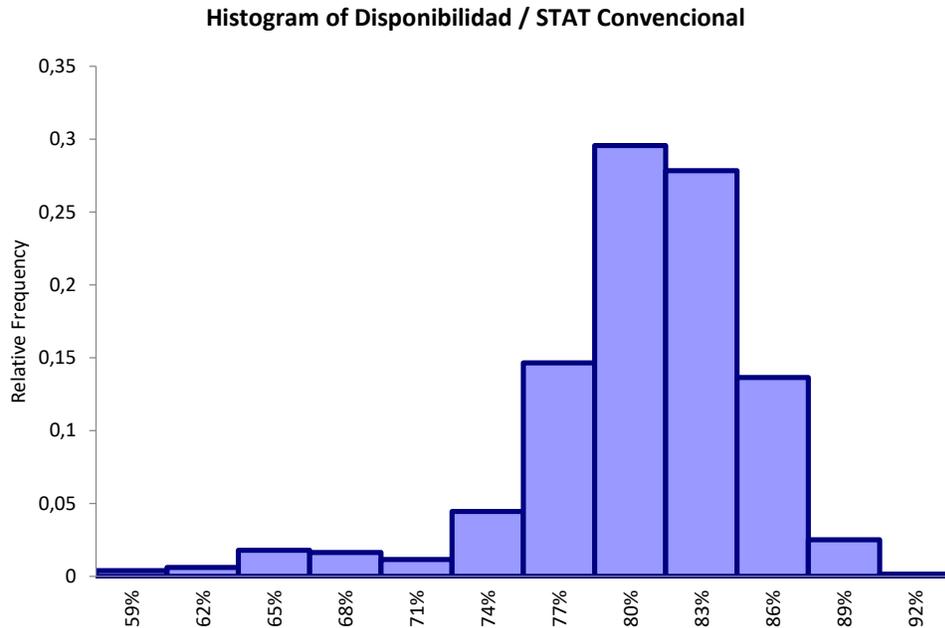


Figura 15 - Histograma de la disponibilidad de la flota de transporte convencional.
Fuente: Elaboración propia

En base a la Figura 15 se observó la distribución de la disponibilidad de la flota de transporte convencional entre los años 2017 y 2018, donde se observó que los datos están sesgados hacia la derecha debido a los esfuerzos de mantener este indicador lo más alto posible. A partir del gráfico se observa que un 75% de la distribución presenta una disponibilidad mayor o igual a 80%.

Al comparar las distribuciones se observa que el camión autónomo presenta una mayor disponibilidad que el camión convencional. Esta diferencia se debe principalmente a fallas reportadas por el operador como, por ejemplo, falla de aire acondicionado.

Uso operativo

Se busca que este indicador sea lo más alto posible, para ello el tiempo operativo debe ser lo más parecido al tiempo disponible y disminuir los tiempos de reserva, ya sean programadas o no programadas, definidos en el modelo de ASARCO de la empresa. Debido a que el camión autónomo no se detiene en cambios de turno o colación se espera que presente un uso operativo mayor al camión convencional.

A continuación, se muestran la distribución del uso operativo de una operación con camiones autónomos y otra de camiones convencionales, en la Figura 16 y Figura 17 respectivamente.

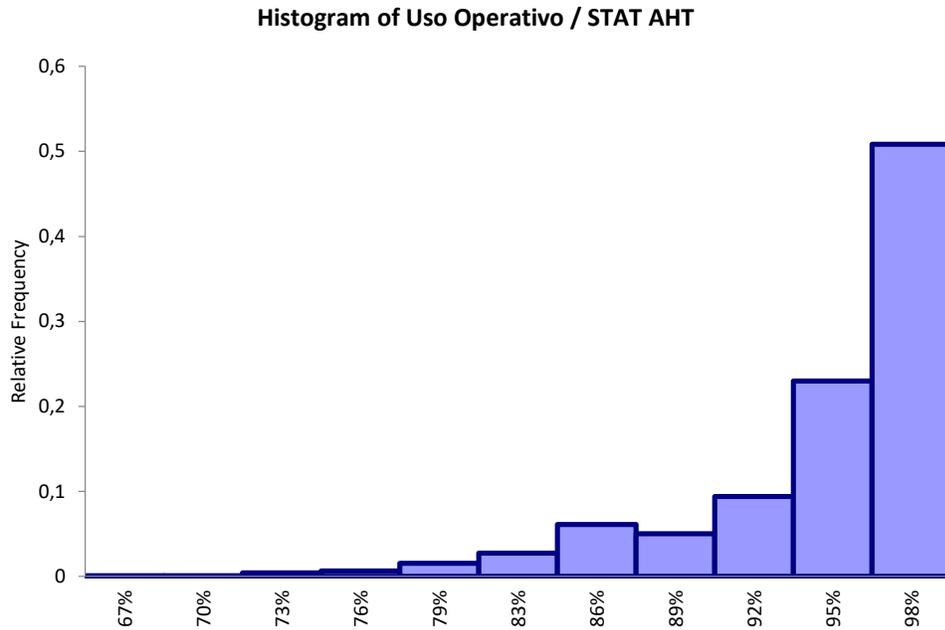


Figura 16 - Histograma de uso operativo de flota de transporte autónomo.
Fuente: Elaboración propia

A partir de la Figura - 16 Histograma de uso operativo de flota de transporte autónomo, se observó que el comportamiento del uso operativo entre los años 2018 y 2019 se encuentra sesgado hacia la derecha debido a que se busca operar el camión la mayor cantidad de tiempo que esté disponible, lo que provoca que aumente el valor de uso operativo, de hecho un 74% de la distribución se muestra sobre el 95% de uso operativo en transporte como se observó en la Figura 16 - Histograma de uso operativo de la flota de transporte autónomo, valor que se relaciona fuertemente con el 98% que busca el área de planificación.

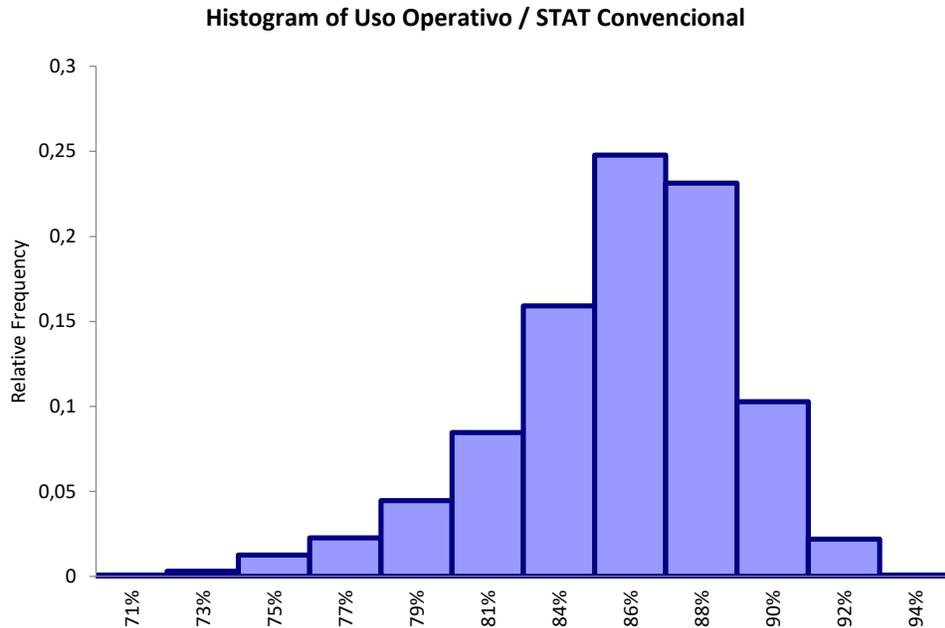


Figura 17 - Histograma de uso operativo de flota de transporte convencional.
Fuente: Elaboración propia

En la Figura 17 - Histograma del uso operativo de flota de transporte convencional, se observó una distribución de los datos con valores de uso operativo más bajos que el caso del camión autónomo, de hecho, un 82 % de la distribución presentó valores de uso operativo mayor al 85%, valor que concuerda con el promedio de uso operativo igual a 85%.

UEBD

Debido a que el camino autónomo no se detiene por cambios de turno y colación este se encuentra mayor tiempo operando, por lo que mientras las pérdidas operacionales y demoras sean mínimas, se espera que el camión autónomo presente una mayor utilización efectiva del tiempo que posee disponible para ser utilizado.

A continuación, en la Figura 18 - Histograma de UEBD de flota de transporte autónomo, se muestra la distribución de UEBD del camión autónomo y en Figura 19 - Histograma de UEBD de flota de transporte convencional, se muestra la distribución de UEBD del camino convencional.

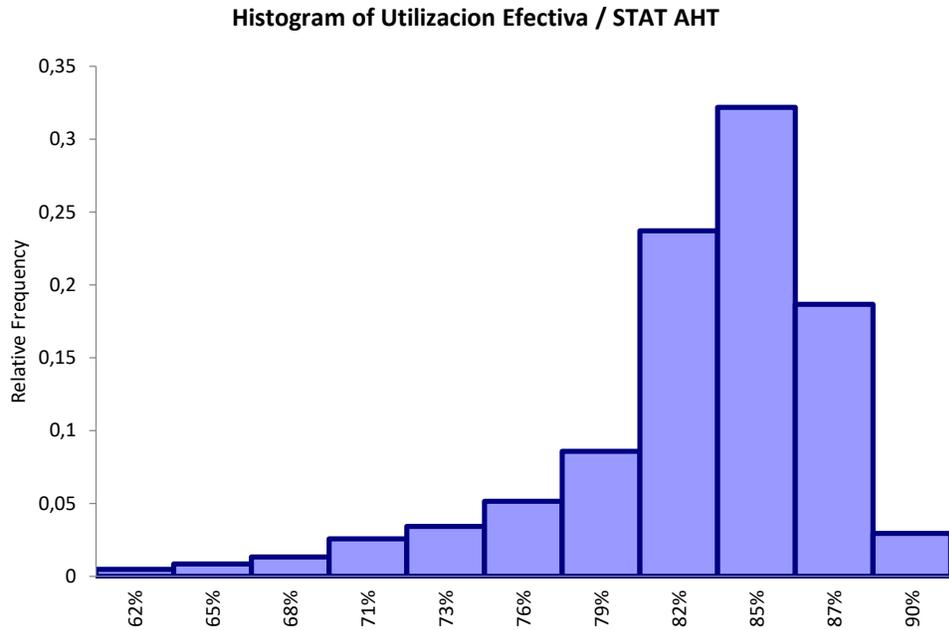


Figura 18 - Histograma de UEBD de flota de transporte autónomo.
Fuente: Elaboración propia

Los esfuerzos de la empresa buscan mantener este indicador sobre el 83%, lo cual se ve reflejado en que el promedio de los datos fue 83%, además de que la distribución se encuentra sesgada hacia la derecha y que el 78% de la distribución presentó una UEBD sobre el promedio, por lo que a futuro se espera con alta probabilidad que la UEBD sea mayor igual a 83%.

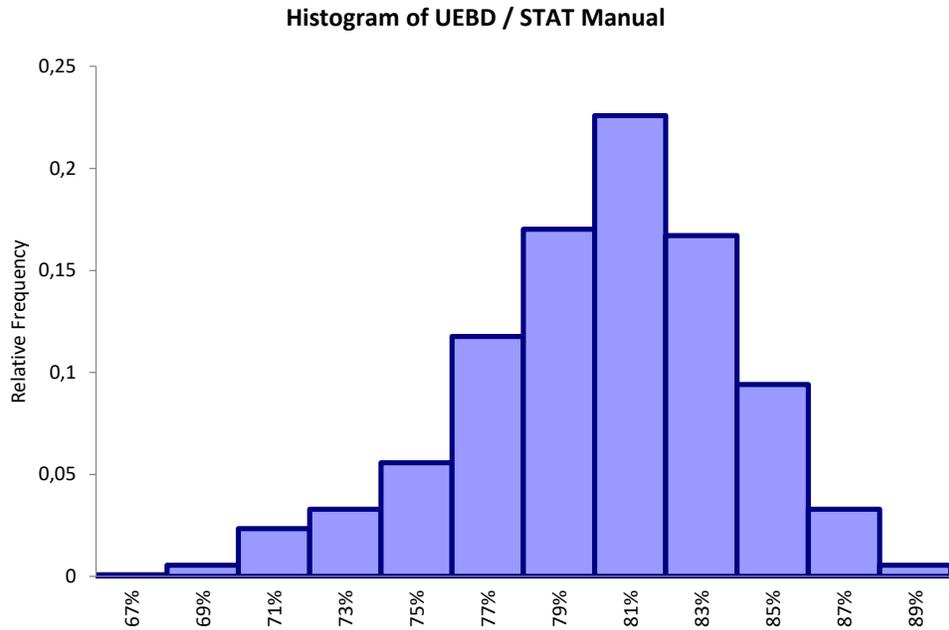


Figura 19 - Histograma de UEBD de flota de transporte convencional.
Fuente: Elaboración propia

La UEBD para el caso convencional presentó un promedio 80% valor que claramente es más bajo que en el caso autónomo. Además, se observó que un 75% de la distribución presentó valores sobre el 80% por lo que se espera con alta probabilidad que la UEBD de un camión convencional sea muy cercana a 80%.

Duración de Neumáticos

Según los datos de la faena en estudio con camiones autónomos se han logrado rendimientos de neumáticos superior a las 9000 horas, lo que representa una alta duración en las horas de vida de un neumático. A continuación, en la Figura 20 – Histograma de horas de baja de neumáticos de flota de transporte autónoma, se muestra la distribución de las horas de baja de neumáticos para una operación autónoma entre los años 2017 y 2018.

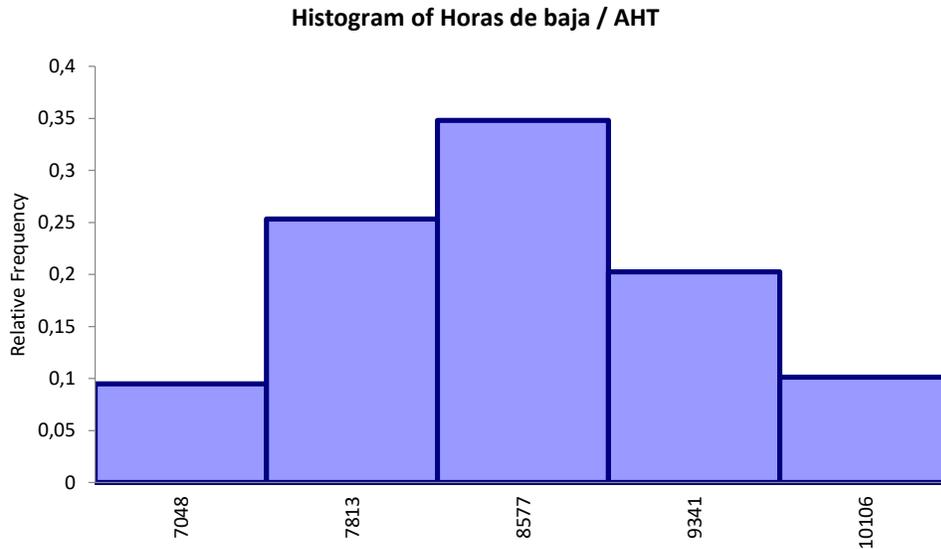


Figura 20 - Histograma de horas de baja de neumáticos de flota de transporte autónomo.
Fuente: Elaboración propia

A partir de la figura 20 - Histograma de horas de baja de neumáticos AHT, se observa que la mayor cantidad de neumáticos muestran una duración cercana a las 8500 horas de baja, valor que se contrasta de manera correcta con las 8500 horas que se estima que duren los neumáticos en esta faena para proyectar el consumo anual. Estos valores son mucho más altos al compararlos con datos de camiones convencionales donde los neumáticos tienen una duración entre 4000 y 5000 horas.

Consumo de lubricantes

Tanto camiones convencionales como camiones autónomos requieren lubricantes para poder funcionar de manera correcta. En el caso del camión Komatsu 930E este ocupa 3 tipos de lubricantes los cuales son utilizados en distintas partes del equipo. A continuación, en Tabla 2 se muestran la duración del lubricante en horas para cada parte del camión y los litros de lubricante que se deben cargar en cada cambio de lubricante al término del tiempo de duración de este.

Tabla 2 - Horas de cambio de lubricante y litros a cargar.
Fuente: Dueño del proyecto no autoriza nombre de la fuente.

Tipo lubricante	Horas	Litros de carga
Motor	500	280
Hidráulico	2000	1330
Motor de Tracción	2500	190

Recopilación de información económica de camiones autónomos y convencionales

En esta etapa se buscó comprender cuales son los principales costos que se asocian a la operación de transporte con camiones autónomos y cuales a camiones convencionales.

Para poder obtener los gastos de los equipos, se recurrió al software computacional SAP, en el cual se ingresan todos los gastos de la compañía. A partir de este software se obtuvo una base de datos para el camión autónomo y otra para el camión convencional entre los años 2018 y 2019.

A continuación, en la Figura 21 se muestra la distribución de costos para el camión autónomo y en Figura 22 se muestra la distribución de costos para el camión convencional.

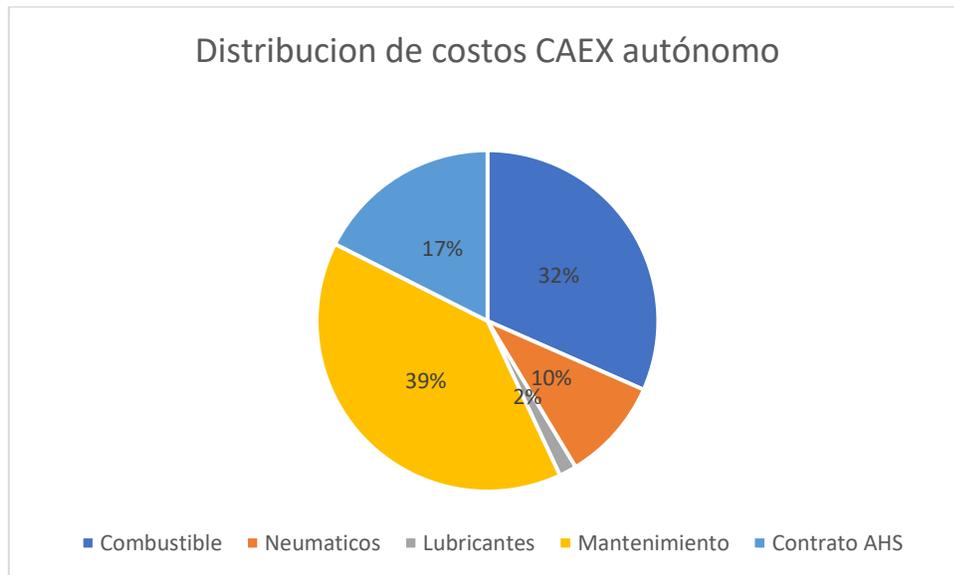


Figura 21 - Distribución de costos de flota de transporte autónomo.
Fuente: Elaboración propia

De la Figura 21 - Distribución de costos de flota de transporte autónomo, se observó que los principales costos de un camión autónomo son: combustibles, neumáticos, lubricantes, mantenimiento y el contrato de licencias para el sistema autónomo.

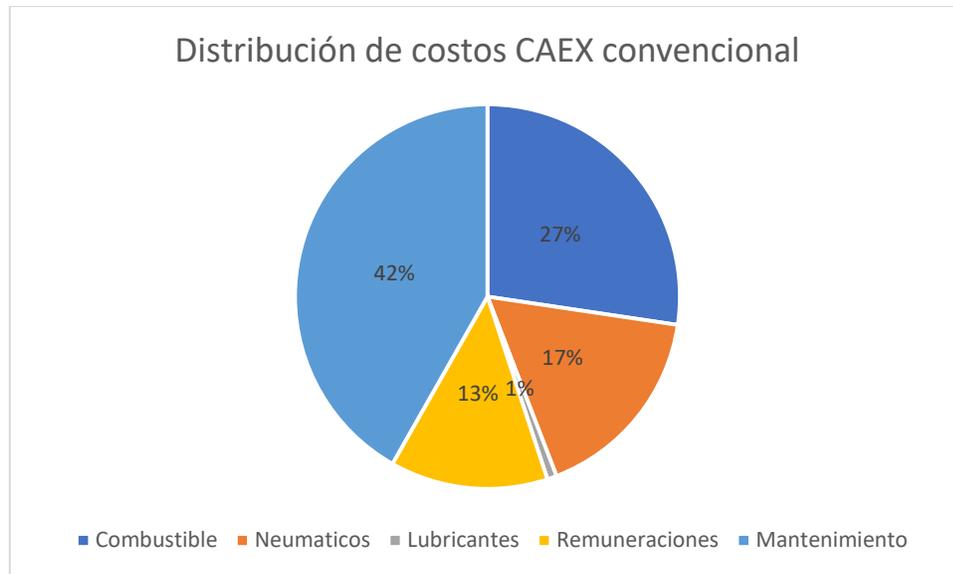


Figura 22 - Distribución de costos de flota de transporte convencional.
Fuente: Elaboración propia

De la Figura 22 – Distribución de costos de flota de transporte convencional, se observó que los costos asociados a operar camiones convencionales son: combustible, neumáticos, lubricantes, remuneraciones a los operadores y mantenimiento de los equipos.

Combustible

De la Figura 21 distribución de costos de flota de transporte autónomo y Figura 22 distribución de costos de flota de transporte convencional, se observó que el combustible además de ser un insumo fundamental para su operación también es uno de los costos más altos para la operación de transporte, por lo que un camión que presente un menor consumo de combustible se espera que presente un menor costo.

En Figura 23 se muestra el costo de combustible que tiene para una operación autónoma y para una operación convencional respectivamente.

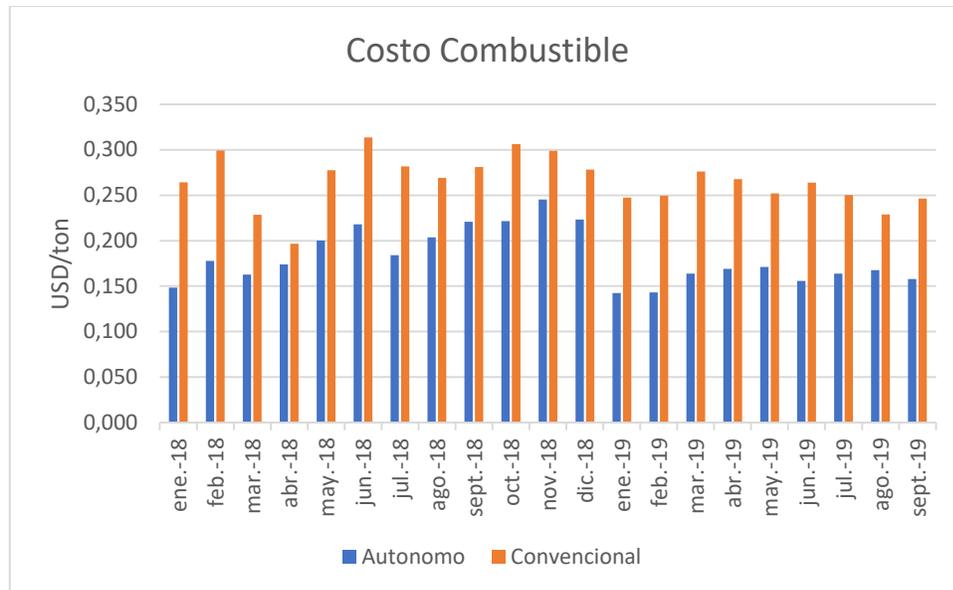


Figura 23 - Costo por consumo de combustible.
Fuente: Elaboración propia

De la Figura 23, se observó que el costo de combustible es más alto para el camión convencional que para el camión autónomo, debido a que este último elimina el factor humano al momento de acelerar, por lo que el equipo opera en función a las indicaciones del fabricante, funcionando a menores revoluciones generando un menor consumo de combustible.

Neumáticos

Los neumáticos resultan ser un insumo esencial para el funcionamiento de un camión, por lo que se busca conseguir una buena gestión de este insumo, la cual permita y asegure maximizar el rendimiento de estos, y con ello disminuir el consumo de neumáticos generando una disminución en el costo total de la operación de transporte de minerales.

Debido a que la operación autónoma presenta mejores indicadores históricos en cuanto al rendimiento de este insumo, con un promedio de 8500 horas de duración vs un caso de camión convencional que ronda las 4500 horas de duración, se espera que el costo sea menor en una operación autónoma.

A continuación, en Figura 24 se muestra el costo por consumo de neumáticos de una operación autónoma y el costo de neumáticos de camiones convencionales.

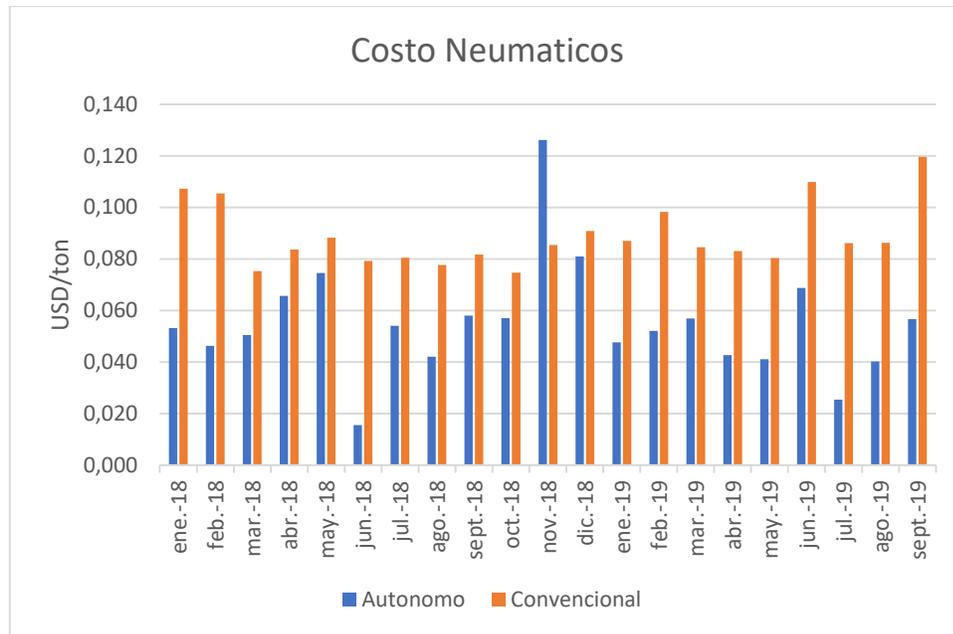


Figura 24 - Costo por consumo de neumáticos.
Fuente: Elaboración propia

De Figura 24, se observó que el costo por consumo de neumáticos es más alto para el camión convencional que para el camión autónomo, lo que se debe a la mayor duración de los neumáticos en el camión autónomo. Los factores que influyen en la estacionalidad de consumo de neumático en los periodos mencionados dan cuenta a la correcta operación de los neumáticos en los camiones autónomos, esto dado por la correcta operación del activo, el camión autónomo opera bajo los parámetros del fabricante y sus algoritmos respetan las velocidades programadas, los radios de giros no superan el planificado por el fabricante, las disminuciones de velocidades y de frenado no son agresivos ya que son calculadas en base a los cálculos realizados de pendientes de caminos y distancias operativas de rutas de transporte.

Lubricantes

Los lubricantes son un insumo fundamental para que los camiones de extracción puedan operar de manera correcta, los cuales se rigen bajo una cantidad de horas de cambio y una cantidad de litros a cargar definida por el fabricante, por lo que anualmente se tendrá un gasto en lubricantes el cual va a depender de las horas que operen los equipos. A continuación, en Figura 25 se muestra el costo por concepto de lubricantes para camiones autónomos y convencionales.

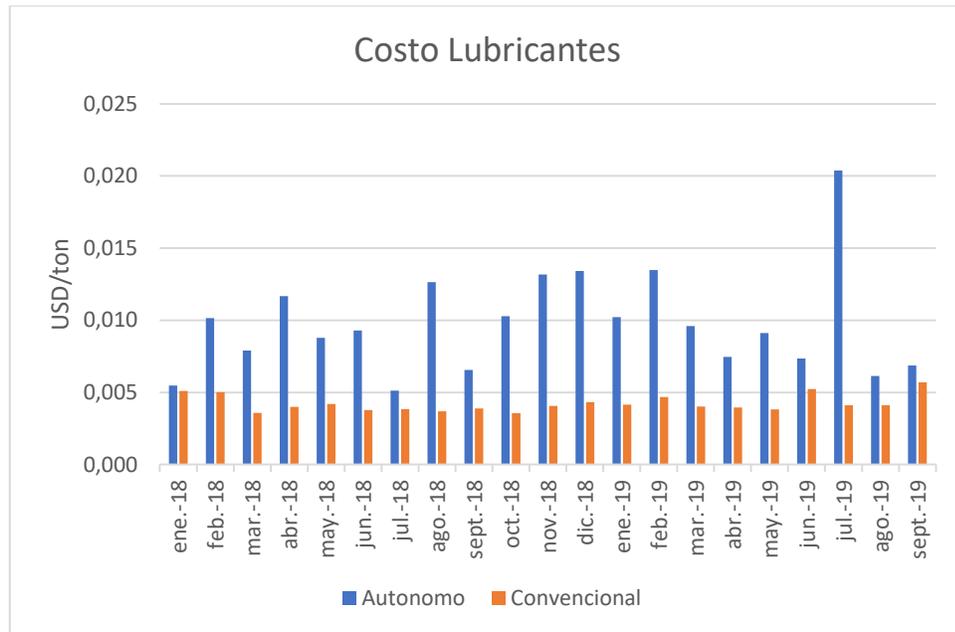


Figura 25 - Costo de lubricantes.
Fuente: Elaboración propia

De la Figura 25, se observó que el costo de lubricantes es mayor para el camión convencional que para el camión autónomo.

Contrato por servicio autónomo

Para que una operación autónoma se pueda llevar a cabo, esta debe contar con un software que permita controlar y monitorear el funcionamiento de los camiones autónomos, es por ello que se adquiere un contrato con el fabricante para proveer este software. Por este motivo el camión autónomo genera un gasto anual en este ámbito, cosa que no ocurre en el caso de operar con camiones convencionales. En la Figura 26 se muestra el costo para la faena minera por concepto de contrato por el servicio autónoma.

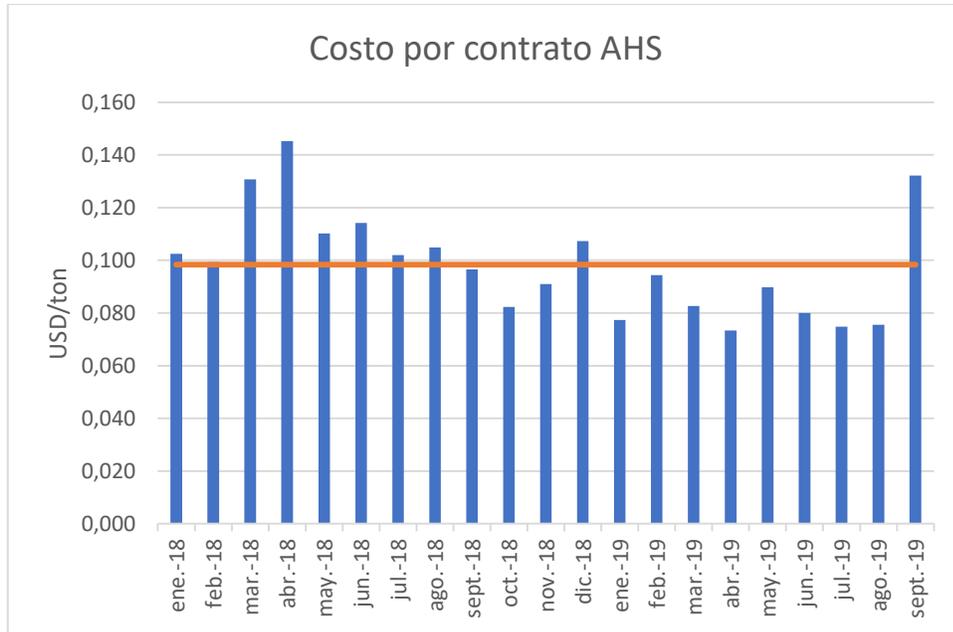


Figura 26 - Costo por contrato de sistema autónomo.
Fuente: Elaboración propia

De la Figura 26 - Costo por contrato de sistema autónomo, se observó que el costo por operar con este sistema aporta en promedio 0,100 USD/ton al costo de transporte con camiones autónomos.

Mantenimiento

El mantenimiento es uno de los costos más grandes que afecta al transporte de minerales, rondando un 40% del costo total de transporte, por este motivo un correcto uso privilegiando el cuidado de los equipos puede presentar un ahorro. En Figura 27, se muestra el costo de mantenimiento para una operación autónoma y una operación con camiones convencionales.

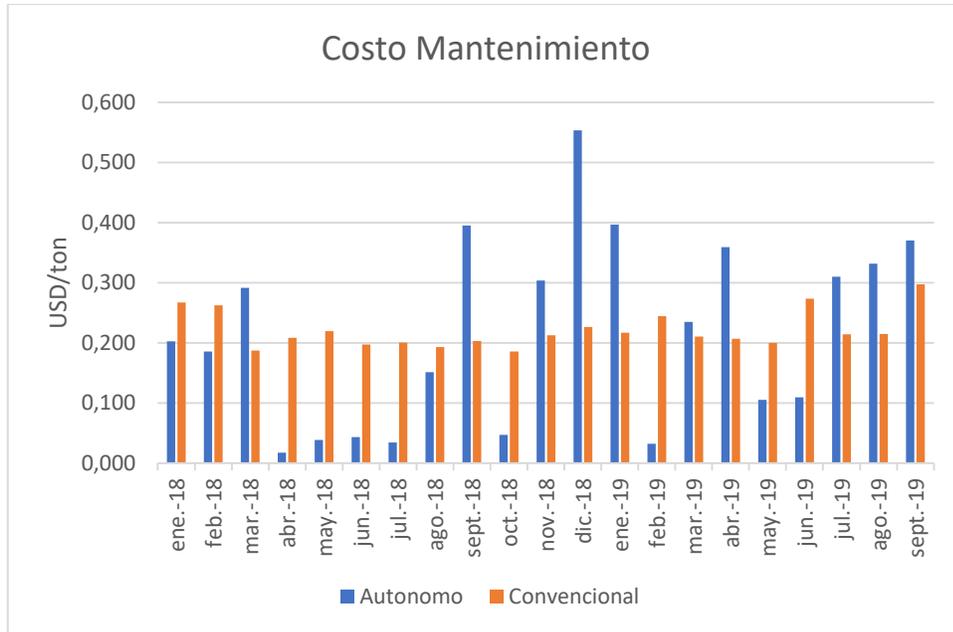


Figura 27 - Costo de mantenimiento.
Fuente: Elaboración propia

A partir de la Figura 27, se observó que el camión autónomo presentó un costo por mantención más bajo que el camión convencional, lo que se debe principalmente a que el primero opera bajo las indicaciones del fabricante, pero también presentó una mayor variabilidad, debido al tipo de contrato de mantención tipo labor plus part, lo cual muestra que una buena gestión de contrato también ayuda a disminuir el costo. Es importante destacar que la estacionalidad de los periodos y mejora de los costos corresponden al cambio del contrato, el nuevo contrato contempla cambiar el componente o repuesto una vez que es validado que su vida útil ya se encuentra cumplida y si este no tiene daño aparente puede continuar en uso, esto mejora las horas de operación de los camiones sin la necesidad de cambiar los repuestos o componentes, si no mejorar su vida u poder utilizar el

componente por mucho mas horas a la que entrega por diseño el fabricante. Esto No baja su calidad ya que son validados por especialistas y asegurados por su vendedor y fabricante.

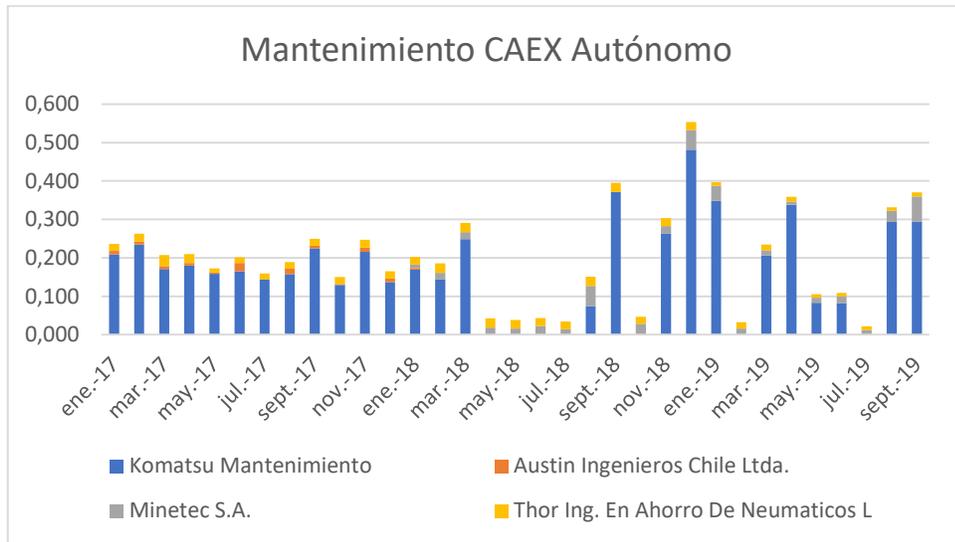


Figura 28 - costo de mantención detallado de camión autónomo.
Fuente: Elaboración propia

En Figura 28, se muestra el detalle de los servicios de mantención prestados por empresas contratistas a la actual faena en estudio, donde Komatsu presta el servicio de mantenimiento integral tipo labor plus part, Austin Ingenieros y Minetec proveen servicio de soldaduras mayores, y finalmente Thor ing. En ahorro de neumáticos presta el servicio de mantenimiento de neumáticos para los equipos de extracción.

Remuneraciones

Las remuneraciones al personal son un gasto importante en el costo de transporte, el cual solo se presenta al operar con camiones convencionales. Este costo generara un impacto en lo que respecta al costo final del costo de transporte de una operación convencional aumentando el costo total, a diferencia del caso autónomo donde este costo se presenta como un ahorro al no necesitar operación para poder mantener su funcionamiento.



Figura 29 – Costo por operadores de camión convencional.
Fuente: Elaboración propia.

A partir de la Figura 29, se observó que el costo por concepto de remuneraciones a operadores para camiones convencionales es en promedio superior a los 0,120 USD/ton

Equipos de movimiento de tierra

La flota de equipos de movimiento de tierra está conformada por motoniveladora, wheeldozer y bulldozer.

Tanto en una operación con camiones autónomos como convencionales estos equipos cumplen un rol fundamental en lo que respecta a facilitar la operación de transporte, esto debido a que deben mantener los frentes de carguío en buenas condiciones para permitir un buen aculatamiento de los camiones, también deben mantener las vías de transporte lo más parejas posibles y libres de obstáculos, como puede ser el material que cae de los camiones al momento de ascender por las rampas hacia sus destinos. En la Figura 30 se muestra el costo de equipos de movimiento de tierra para camiones autónomos y camiones convencionales

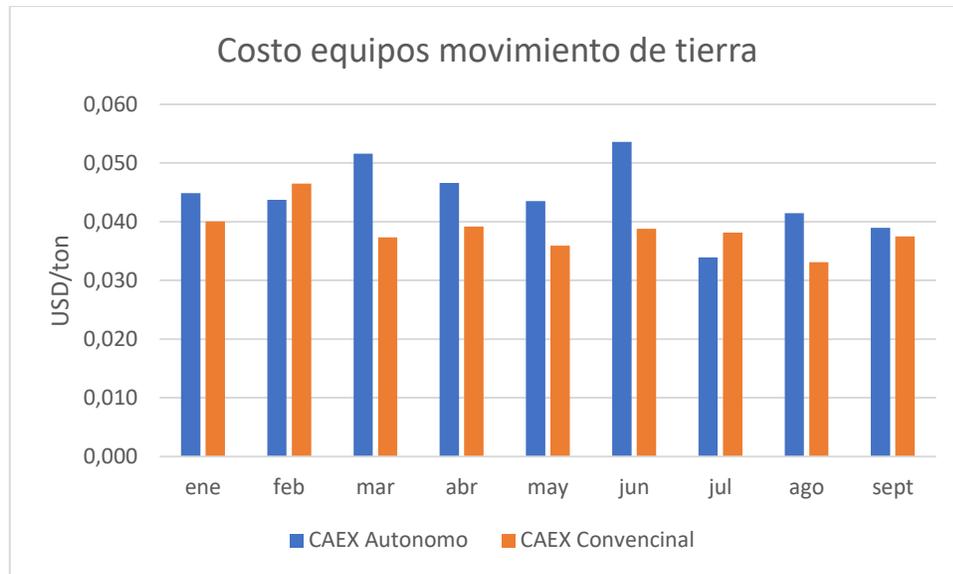


Figura 30 - Costo de quipos de movimiento de tierra.
Fuente: Elaboración propia.

A partir de la Figura 30 se observó que el costo en equipos de movimiento de tierra fue más alto para el caso de operar con camiones autónomos, esto se debe a que el equipo autónomo requiere una mayor utilización de estos equipos porque necesita mantener las vías de transporte despejadas ya que este avanza por rutas preestablecidas por el usuario, por lo que si se encuentra con algún obstáculo el camión se detendrá en el caso de ser muy grande o puede dañar los neumáticos en caso de ser más pequeño.

Evaluación Económica

En esta evaluación se busca responder si es más rentable continuar explotando la mina mediante un sistema de transporte autónomo o si por el contrario es más rentable operar a través de un sistema de transporte convencional. Dicha evaluación se enmarca en un periodo de evaluación entre los años 2020 y 2027 y lo que se busca es poder cumplir con los requerimientos de tonelaje transportados establecidos en el plan de negocios y desarrollo de la faena.

Para poder comparar las tecnologías de transporte primero se deben calcular la cantidad de camiones que deben componer la flota para cumplir con los requerimientos, esto basado en los parámetros operacionales que se espera que tengan los equipos, para posteriormente calcular los gastos anuales en cada sistema de transporte basándose en los costos operacionales presentados en el punto anterior, de modo de poder determinar la opción más rentable.

Inputs operacionales

Para el cálculo de las flotas de camiones autónomos y convencionales se utilizaron los indicadores operacionales de disponibilidad, uso operativo, UEBD, los cuales se obtuvieron del

análisis de parámetros operacionales y se muestran en Tabla 3. Además, se utilizaron parámetros de velocidades, consumo de combustible y consumo de lubricantes, cuyos valores se obtuvieron del área de planificación minera y se muestran en Tabla 4, Tabla 5 y Tabla 6.

Tabla 3 - Parámetros operacionales.
Fuente: Dueño del proyecto no autoriza nombre de la fuente.

	Unidad	CAEX Autónomo	CAEX Convencional
Disponibilidad	%	84	80
Uso Operativo	%	94	85
UEBD	%	83	80

Tabla 4 - Consumo de combustible según perfil de transporte.
Fuente: Dueño del proyecto no autoriza nombre de la fuente.

Consumo Combustible	Unidad	Autónomo	Convencional
Horizontal Cargado	Lt/h	203	213
Horizontal Vacío	Lt/h	145	152
Subiendo Cargado	Lt/h	263	276
Bajando Vacío	Lt/h	145	152
Ralentí	Lt/h	145	152

Tabla 5 - Velocidades según perfil de transporte.
Fuente: Dueño del proyecto no autoriza nombre de la fuente.

Velocidad	Unidad	Autónomo	Convencional
Horizontal Cargado	Km/h	34	36
Horizontal Vacío	Km/h	36	36
Subiendo Cargado	Km/h	12	13
Bajando Vacío	Km/h	26	28

Tabla 6 - Horas de cambio de lubricante y litros cargados.
Fuente: Dueño del proyecto no autoriza nombre de la fuente.

Lubricantes	Horas de cambio (h)	Litros cargados (L)
Motor	500	280
Hidráulico	2000	1330
Motor de Tracción	2500	190

Inputs económicos

Para realizar la evaluación económica y cálculo de los gastos incurridos por cada flota, es necesario utilizar ciertos parámetros económicos obtenidos de la recopilación de información como costo de remuneraciones, costo de mantención, costo equipos de movimiento de tierra, costo por servicio autónomo, además de precios de Neumáticos, combustible y lubricantes, estos valores se muestran a continuación en Tabla 7 y Tabla 8.

Tabla 7 - Costo de combustible y precio de neumático.
Fuente: Dueño del proyecto no autoriza nombre de la fuente.

Ítem	Unidad	Precio
Combustible	USD/lt	0,60
Neumáticos	USD	40.600

Tabla 8 - Costo de lubricantes.
Fuente: Dueño del proyecto no autoriza nombre de la fuente.

Tipo de lubricante	Unidad	Precio
Motor	USD/lt	1,96
Hidráulico	USD/lt	1,45
Motor de Tracción	USD/lt	7,09

Además de los inputs presentados, en el caso del camión convencional, este requiere de un operador en cada equipo para poder operar, para ello considerando que en esta faena existen 4 grupos de trabajo y que además se deben considerar vacaciones y licencias médicas, la división propone un factor dotacional de 4,7 operadores por equipo, para poder operar en los distintos turnos de trabajo.

También se debe considerar el gasto en el que debe incurrir la empresa por cada operador, considerando, además del sueldo base, todos los gastos agregados. El valor del gasto anual por operador se estima de 77.722 USD. El detalle del gasto por operador se muestra en anexos 7.1.

En cuanto al mantenimiento esta evaluación considera un servicio externo, del tipo Labor Pluss Part, el cual tiene un costo fijo y otro variable. Estos inputs se muestran en Tabla 9 y Tabla 10 respectivamente.

Tabla 9 - Costo fijo de mantención.
Fuente: Dueño del proyecto no autoriza nombre de la fuente.

Costo Fijo por cada camión	Unidad	AHT/Convencional
Acceso a Pool de componentes	USD/mes	2.088
Mano de Obra LPP	USD/mes	15.061

Tabla 10 - Costo variable de mantención.
Fuente: Dueño del proyecto no autoriza nombre de la fuente.

Costo Variable por cada camión	Unidad	AHT
LPP Repuestos	USD/h	1,84
Componentes	USD/h	3,06

El costo variable de mantenimiento se entiende debe aumentar con el paso del tiempo, sin embargo, en la empresa en estudio se realizó recientemente un cambio en el tipo de contrato de mantención por lo que en este trabajo no resulto posible cuantificar el aumento que tiene este costo en el tiempo. Por este motivo la empresa decidió realizar un estudio de factibilidad del nuevo contrato tipo Labor Plus Part.

Cálculo de flotas de camiones

En esta etapa se calcularon, las flotas de camiones autónoma y camiones convencionales requerida para poder cumplir con el tonelaje de producción requerido en el plan de negocios y desarrollo propuesto por la gerencia de planificación. Este cálculo se hizo en base a los inputs operacionales presentados anteriormente.

En primera instancia se calcularon los tiempos de ciclo para cada tipo de camión, considerando sus respectivos parámetros y la distancia que deben recorrer las flotas de transporte en los periodos 2020 a 2027, en base a la ecuación 6 que se muestra a continuación.

El tiempo de ciclo se calculó a partir de la siguiente expresión:

$$T_{ci} = T_c + T_v + T_d + T_{dem} + T_a \quad (6)$$

Donde:

- Tci: tiempo de ciclo
- Tc: tiempo de carguío
- Tv: tiempo de viaje
- Td: tiempo de descarga y maniobra
- Tdem: tiempo por demoras

Para el tiempo de carga de los equipos de transporte se utilizaron los tiempos que se muestran en la Tabla 11.

Tabla 11 - Tiempo de carguío según equipo utilizado.
Fuente: Dueño del proyecto no autoriza nombre de la fuente.

Equipo de carguío	Unidad	Tiempo carguío
Pala Eléctrica	min	3,12
Pala Hidráulica	min	3,83
Cargador Frontal	min	7,72

Además, en ciertas ocasiones los equipos de carguío presentan disponibilidad, pero no requieren ser utilizados, por lo que se privilegia el uso de las palas eléctricas, seguido de la pala hidráulica y finalmente los cargadores frontales. En Tabla 12 se muestra la distribución porcentual del tonelaje planificado que cargara cada flota de carguío.

Tabla 12 - Porcentaje a cargar por cada equipo de carguío
Fuente: Dueño del proyecto no autoriza nombre de la fuente.

Equipo	Unidad	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027
Pala Eléctrica	%	62	61	69	68	62	67	65	63
Pala Hidráulica	%	21	23	21	19	20	21	20	25
Cargador Frontal	%	18	16	10	13	18	12	15	12

Posteriormente se calcularon los tiempos de viaje para la flota autónoma y la flota convencional en el periodo 2020-2027, basándose en las distancias medias a recorrer cada año y las velocidades en los distintos perfiles, presentadas en la sección 3.1 Inputs Operacionales.

En Anexos 7.2.3 Cálculo de tiempos de viaje, se muestran los tiempos de viaje promedio para la flota autónoma y flota convencional respectivamente.

El tiempo de viaje de los equipos de transporte autónomo y convencional, se calculó según se muestra en ecuación 7.

$$Tiempo\ de\ viaje = THc + TSc + TBv + THv \quad (7)$$

Donde:

-THc: tiempo que los equipos avanzan de manera horizontal y cargados.

-TSc: tiempo que los equipos suben por la rampa cargado.

-TBv: tiempo que los equipos bajan por la rampa vacío.

-THv: tiempo que los equipos avanzan de manera horizontal y vacíos.

En cuanto a los tiempos de descarga y tiempo de espera en cola se espera que sean iguales para el camión autónomo y el camión convencional donde el tiempo de descarga es de 1 minuto y el tiempo de espera en cola es de 2,4 minutos.

De esta manera se obtuvo los tiempos de ciclo promedio de la flota autónoma y convencional para el periodo comprendido entre los años 2020 y 2027, los que se muestran en Tabla 13 y Tabla 14 respectivamente.

Tabla 13 - Tiempos de viaje promedio de flota de transporte autónomo.
Fuente: Elaboración propia

Autónomo	Unidad	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027
THc	Min	1,91	2,19	3,27	2,77	3,09	4,19	3,53	3,88
THv	Min	1,77	2,02	3,02	2,56	2,85	3,87	3,26	3,58
TSc	min	8,67	8,81	7,22	8,02	7,54	6,61	7,40	7,12
TBv	min	4,00	4,07	3,56	3,70	3,48	3,05	3,42	3,29

Tabla 14 - Tiempos de viaje promedio de flota de transporte convencional.
Fuente: Elaboración propia.

Convencional	Unidad	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027
THc	min	1,79	2,04	3,06	2,59	2,88	3,91	3,30	3,62
THv	min	1,77	2,02	3,02	2,56	2,85	3,87	3,26	3,58
TSc	min	8,07	8,20	7,18	7,46	7,02	6,15	6,89	6,63
TBv	min	3,75	3,81	3,33	3,46	3,26	2,85	3,20	3,08

Una vez calculado los tiempos de ciclo se procedió a calcular el número de ciclos que realiza un camión en el año y el tonelaje movido en esa cantidad de ciclos, y de esta manera calcular la cantidad de equipos que deben componer cada flota para cumplir con el tonelaje planificado a extraer (véase Anexo 7.2).

En Figura 31, se muestra la cantidad de camiones requeridas por año.

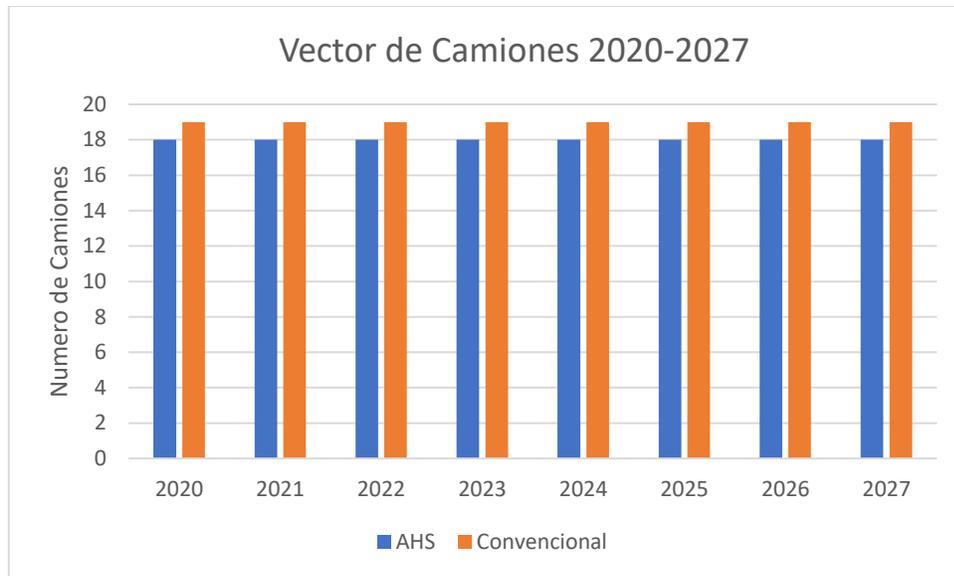


Figura 31 - Cantidad de camiones de flota autónoma y convencional.
Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 31 - Vector de camiones para flota autónoma y convencional, se observa que en el periodo 2020 a 2027 que en el caso de utilizar camiones convencionales se requiere un camión más que al compararlo con los 18 camiones requeridos para componer una flota autónoma. Esta situación se debe a la mayor utilización que presentan los equipos autónomos.

Consumos anuales

3.1.1.1 Consumo Combustible

En esta etapa se calculó los litros de combustible consumidos por año por la flota autónoma y los litros consumidos por año por la flota convencional en el periodo 2020 a 2027. El cálculo del consumo de combustible se muestra en anexo 7.3.1 Cálculo de consumo de combustible.

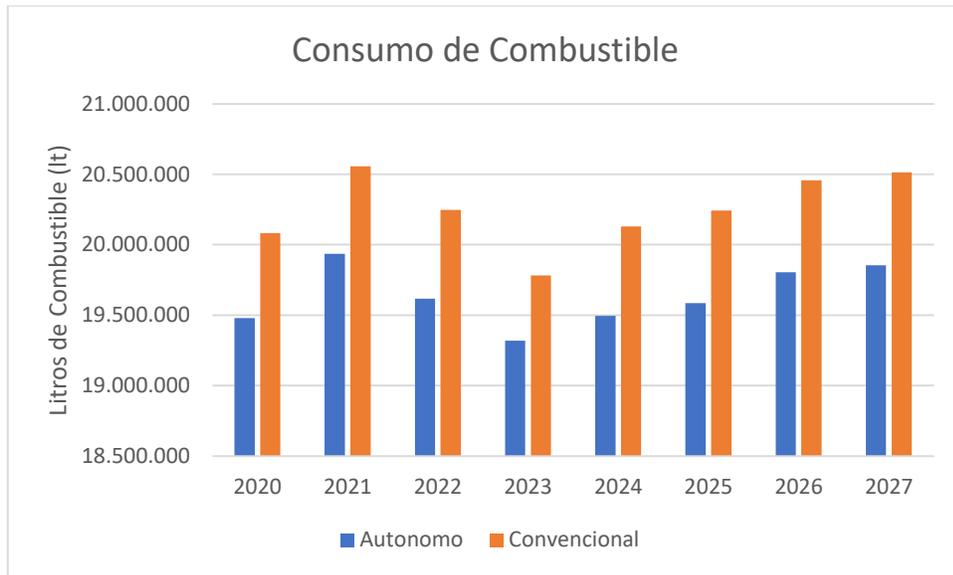


Figura 32 - Consumo de combustible de flotas de transporte autónoma y convencional.
Fuente: Elaboración propia.

De la Figura 32- Consumo de combustible de las flotas de transporte, se observó que el consumo de combustible del camión convencional es superior al consumo del camión autónomo

3.1.1.2 Consumo de Neumáticos

En este ítem se calculó el número de Neumáticos que ocuparía cada tipo de flota en el periodo 2020 a 2027. El procedimiento de cálculo se muestra en anexos 7.3.2 Cálculo de consumo de neumáticos.

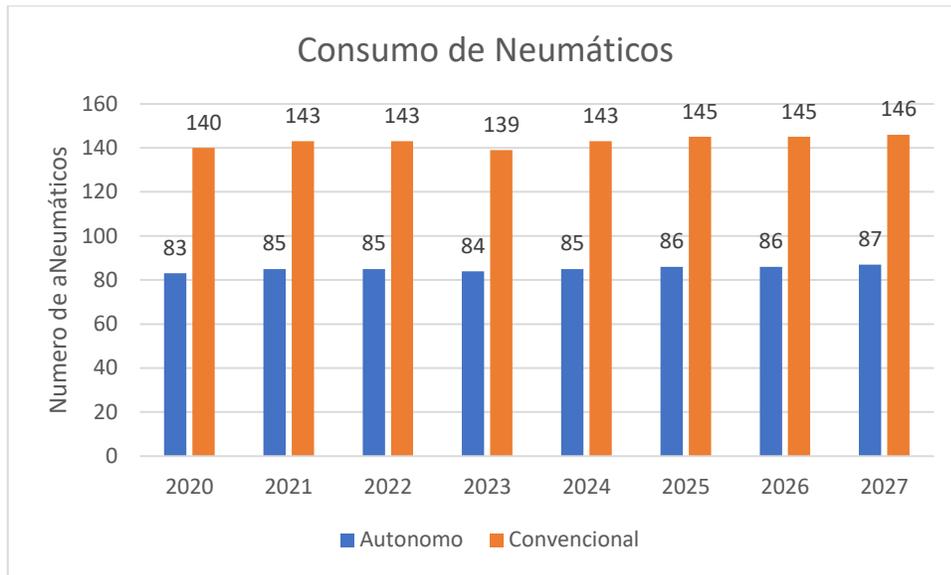


Figura 33 - Neumáticos consumidos por flota de transporte autónomo y convencional
Fuente: Elaboración propia.

De la Figura 33 – Neumáticos consumidos por flota de transporte autónomo y convencional, se observa que el consumo de neumáticos es menor para el caso de utilizar camiones autónomos, alcanzando una reducción de hasta 41% en el consumo anual de neumáticos.

3.1.1.3 Consumo de Lubricantes

En este ítem se calculó los litros de lubricantes que ocuparía cada tipo de flota en el periodo 2020 a 2027. El procedimiento de cálculo y los litros consumidos se muestran en anexo 7.3.3 Cálculo de consumo de lubricantes.

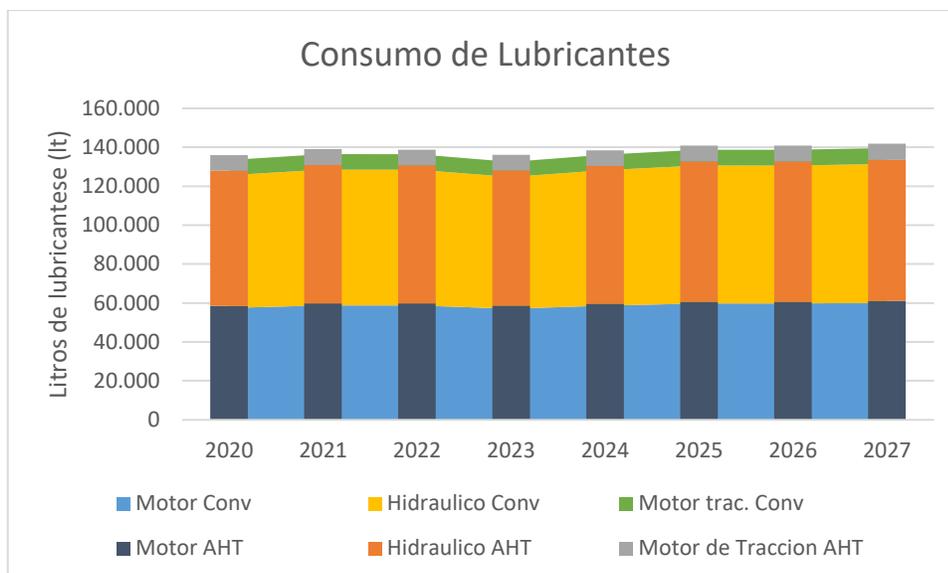


Figura 34 - Consumo de lubricantes de flota autónoma y convencional.
Fuente: Elaboración propia.

De la Figura 34 – Consumo de lubricantes de flotas de transporte autónoma, se observa que el caso de la flota de transporte requiere una mayor cantidad de litros de lubricante que recargar durante los periodos 2020 a 2027, esto se debe a que estos camiones presentan un mayor tiempo operativo por lo que se requieren más cambios de lubricante.

3.1.1.4 Gasto en Remuneraciones

En cuanto a las remuneraciones de operadores, estas solo se consideran para el camión convencional, ya que el camión autónomo no requiere operadores para funcionar. El cálculo se muestra en anexo 7.3.4 cálculo de operadores.

Para poder operar de manera correcta la flota convencional compuesta por 19 camiones se necesitan 90 operadores por año lo que significa un mayor costo anual de 6.9 MUSD.

4 RESULTADOS Y DISCUSIONES

Luego de calcular la cantidad de camiones que componen las flotas y los insumos requeridos en el periodo 2020 a 2027, se procedió a calcular los gastos correspondientes en cada caso. Los gastos se muestran en anexo 7.4. A partir de los gastos anuales se calculó el costo de transportar una tonelada y el valor actual de costos de operar con una flota autónoma vs una flota convencional en la faena minera en estudio

A continuación, en Tabla 15 se muestra el costo asociado a cada flota de transporte y en figura 35 el valor actual de costo para el periodo 2020 a 2027.

Tabla 15 - Costo de transporte de flota autónoma y convencional.
Fuente: Elaboración propia.

Camiones	Unidad	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027
AHT	USD/ton	0,49	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,51	0,51
Convencional	USD/ton	0,61	0,58	0,58	0,58	0,58	0,59	0,59	0,59

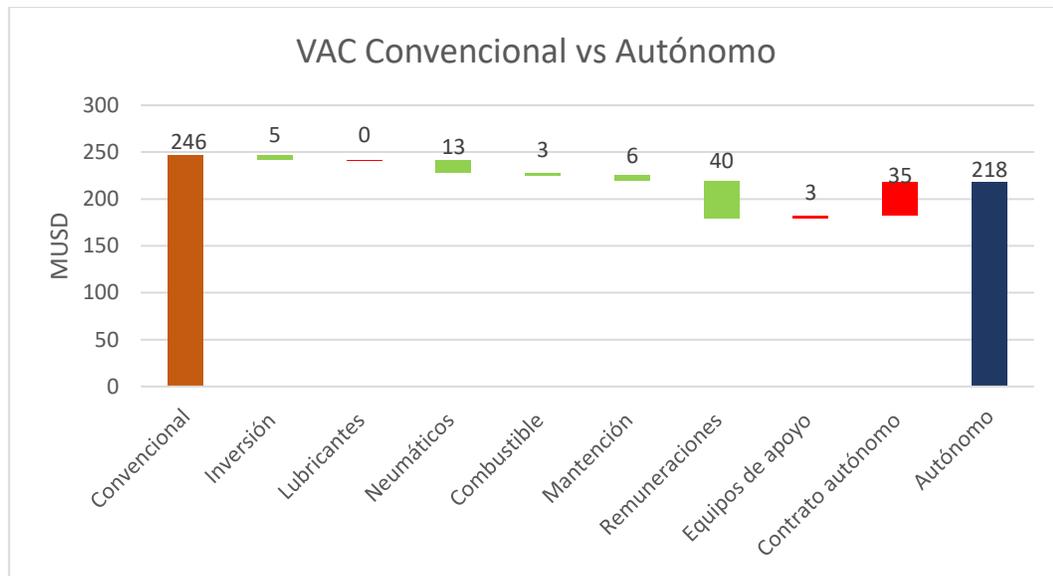


Figura 35 - VAC de flota autónoma y flota convencional
Fuente: Elaboración propia

A partir de Figura 35 – VAC flota Autónoma vs flota Convencional, se observó que la flota convencional representa un mayor gasto en primer lugar por la inversión requerida para aumentar la flota de transporte de 18 a 19 camiones, además de un mayor gasto en lo que es neumáticos, combustible, y mantenimiento de equipos, sin embargo genera un ahorro en lo que respecta a los servicios por equipos de apoyo, contrato por sistema autónomo y un leve ahorro por un menor consumo de lubricantes.

Análisis de riesgo

En esta etapa se realizó un análisis de riesgo, basado en el comportamiento esperado de ciertos indicadores operacionales (disponibilidad, uso operativo, UEED) e identificando dos tipos de salida:

- VAC de cada tipo de camión en el periodo 2020 a 2027
- Costo promedio de transportar una tonelada en el periodo 2020 a 2027

Cabe considerar que se utilizó como criterio de ajuste de distribución de los parámetros operacionales el criterio de información de Akaike [13], para el conjunto de datos entre los años 2018 y 2019 en el caso autónomo y datos de 2017 y 2018 para el caso de camión convencional.

La Figura 36 ajuste de distribución de disponibilidad de flota de transporte autónomo, representa la curva de distribución que más se ajusta al comportamiento que muestra la disponibilidad de camiones autónomos en el periodo 2018 a 2019. La curva que mejor se ajusta tiene una distribución Weibull, dado el esfuerzo y objetivo que busca cumplir el área de mantenimiento con un valor de 85%.

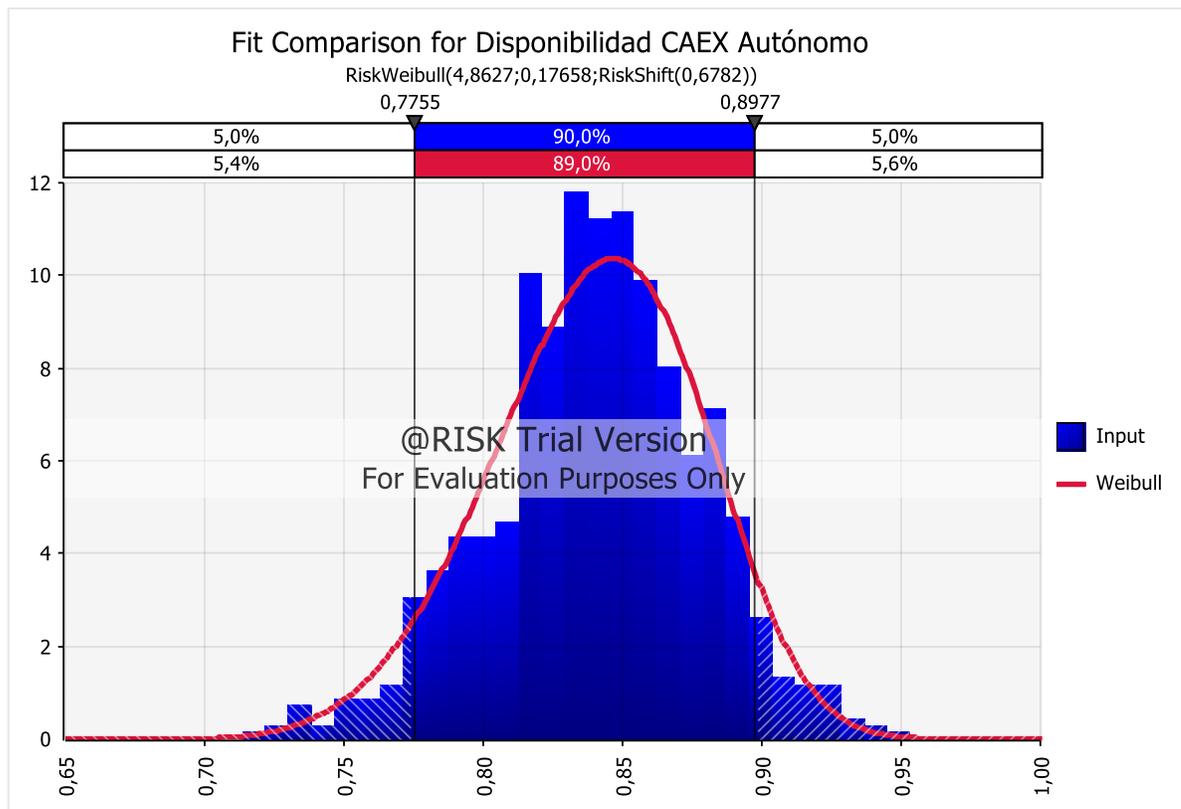


Figura 36 - Ajuste de distribución de disponibilidad de flota de transporte autónomo.
Fuente: Elaboración propia

En la Figura 37 - Ajuste de distribución de disponibilidad de flota de transporte convencional, se observa la curva de distribución que mejor se ajusta al comportamiento que presentó la disponibilidad de camiones autónomos en el periodo 2018 a 2019, dicha curva se ajusta a una distribución ExtvalueMin.

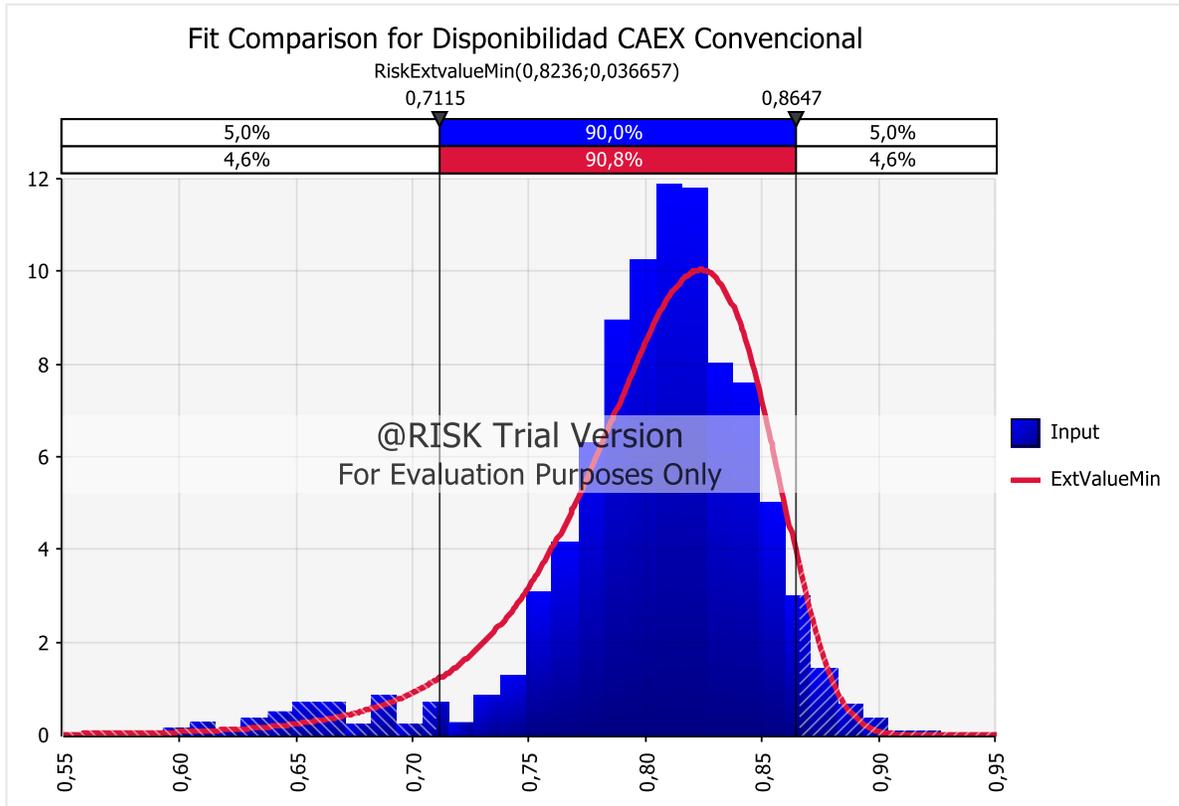


Figura 37 - Ajuste de distribución de flota de transporte convencional.
Fuente: Elaboración propia.

La Figura 38 ajuste de distribución de uso operativo de flota de transporte autónomo muestra que la curva que mejor se ajusta a los datos de uso operativo, corresponde a un ajuste de distribución PERT, ya que la mayor parte del tiempo los camiones estuvieron operando y no en reserva, lo que justifica que la distribución esté sesgada hacia la derecha, además este indicador es el que permite determinar la cantidad de horas operativas de la flota de transporte autónomo.

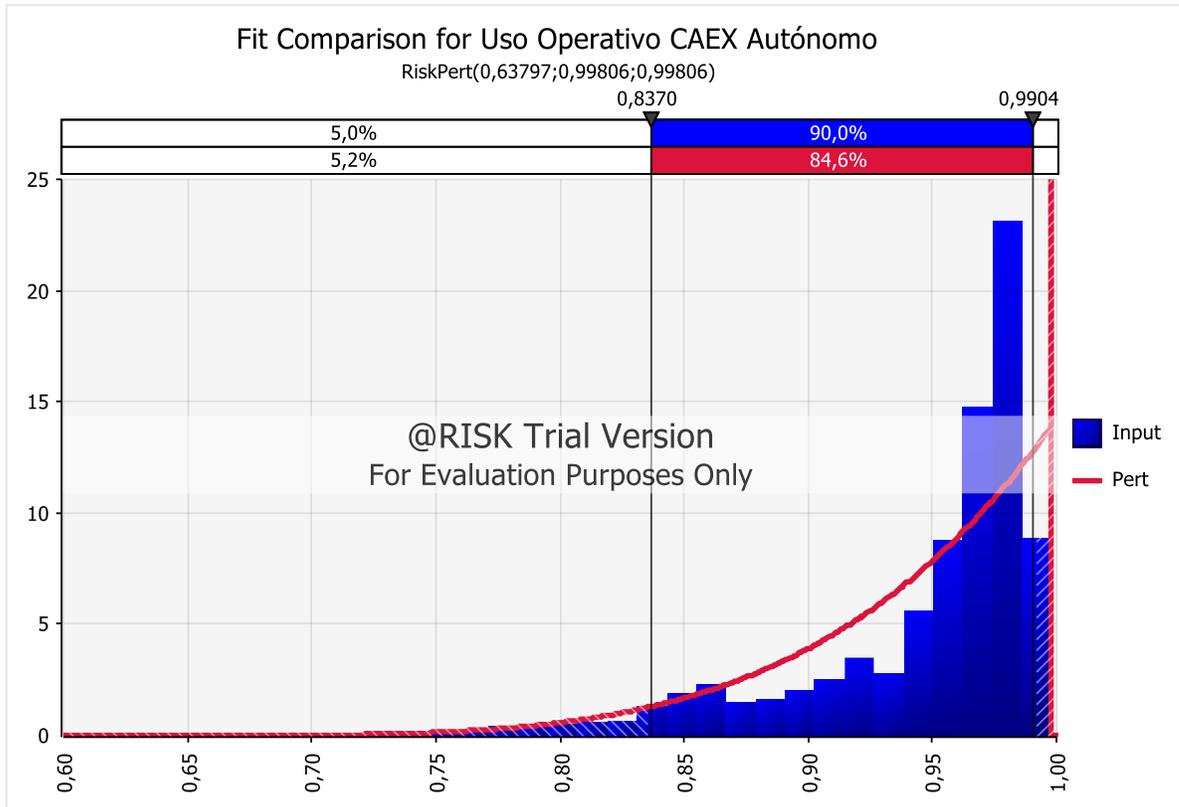


Figura 38 - Ajuste de distribución de uso operativo de flota de transporte autónomo.
Fuente: Elaboración propia.

La figura 39 - Ajuste de distribución de uso operativo de flota de transporte convencional muestra que la distribución que tienen los datos de uso operativo de camiones convencionales y la curva que mejor se ajusta a estos datos, la cual corresponde a un ajuste de distribución ExtvalueMin.

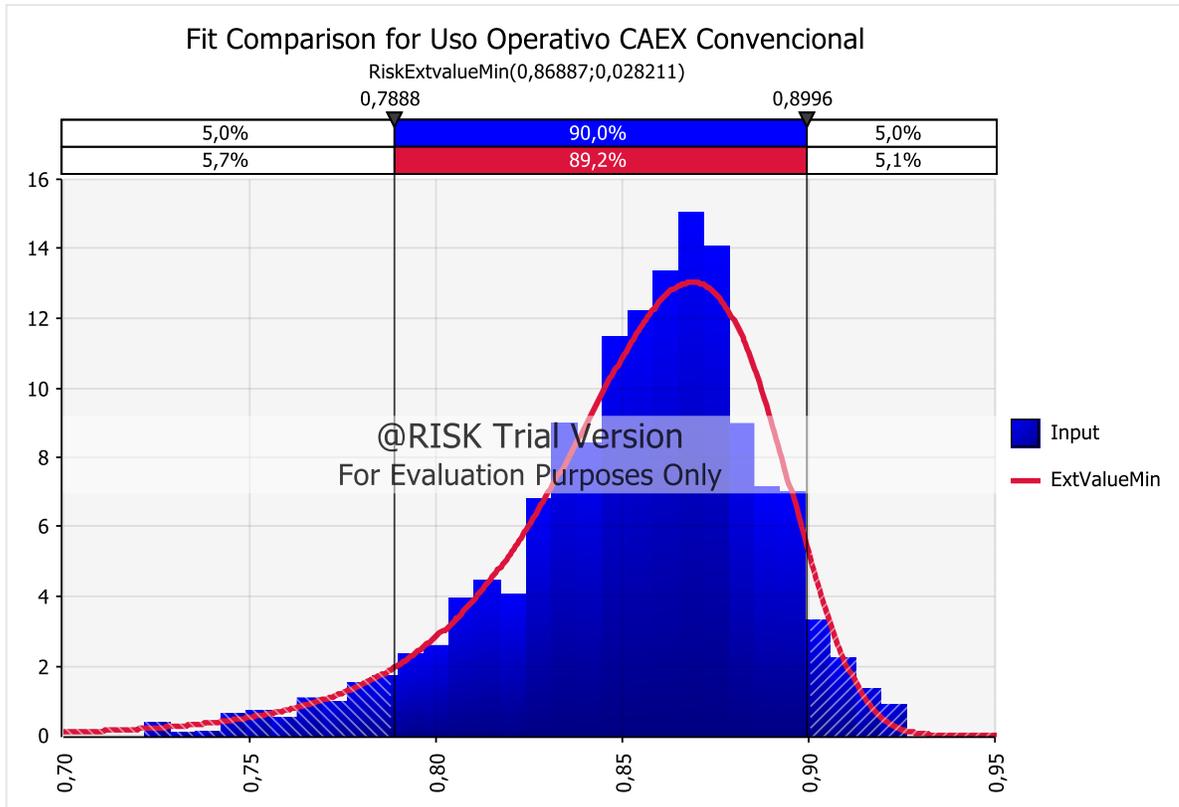


Figura 39 - Ajuste de distribución de uso operativo de flota de transporte convencional.
Fuente: Elaboración propia.

La diferencia entre la distribución que muestra el camión autónomo y el camión convencional en cuanto al uso operativo se justifica en que para un camión autónomo se espera que este permanezca más tiempo operativo y menos tiempo en reserva que un camión convencional, principalmente por cambios de turno y colación.

La Figura 40 - Ajuste de distribución de UEBD de flota de transporte autónomo, muestra la distribución de los datos de UEBD obtenida de la base de datos 2018-2019 de los indicadores operacionales del camión autónomo y la curva que mejor se ajusta a la distribución que siguen estos datos corresponde a ExtvalueMin.

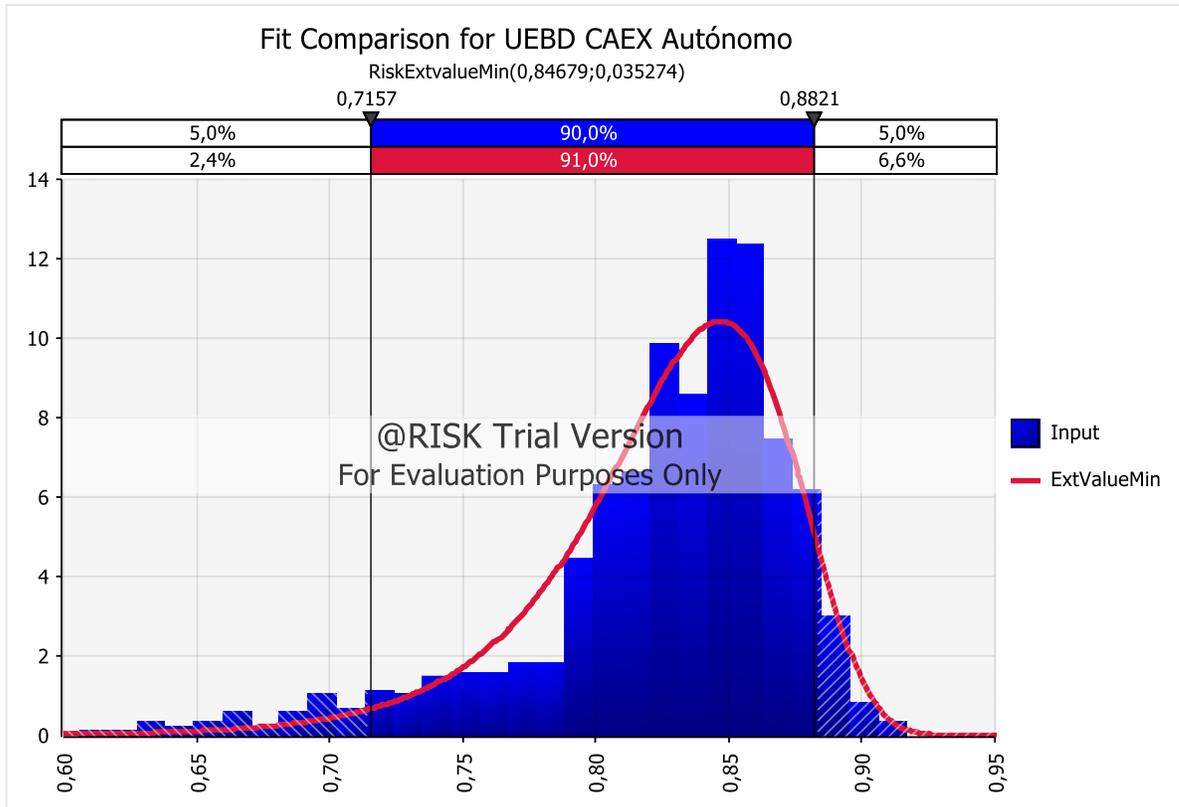


Figura 40 - Ajuste de distribución de UEBD de flota de transporte autónomo.
Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 41 - Ajuste de distribución de UEBD de flota de transporte convencional, se muestra el comportamiento de la UEBD presentado por camiones convencionales durante los años 2017 y 2018. Para estos datos se tiene que la curva que mejor se ajusta a la distribución que siguen estos datos corresponde a una distribución Weibull.

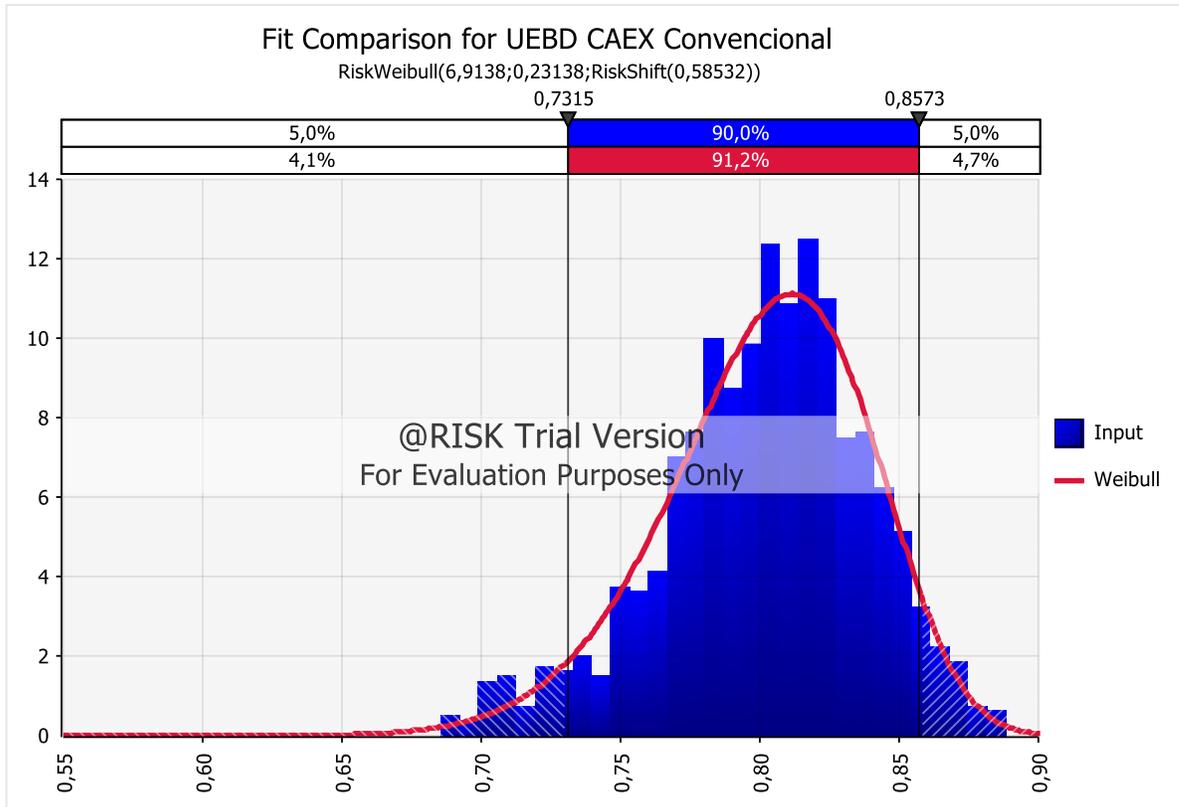


Figura 41 - Ajuste de distribución de UEBD de flota de transporte convencional.
Fuente: Elaboración propia.

Una vez conocido el comportamiento de las variables presentadas anteriormente se procedió a realizar la simulación del modelo.

La Figura 42 simulación de VAC-CAEX autónomo genera una banda de valores, la cual muestra que el 90% de las iteraciones presentan valores entre los 203,2 MUSD y 235,3 MUSD, lo cual representa el gasto que tendría asociado el seguir operando con camiones autónomos en el periodo 2020 a 2027, siendo la media 218,1 MUSD con una desviación estándar de 9,7 MUSD.

En cuanto a costos, en Figura 43 se muestra la simulación del promedio del costo de transporte de la flota autónoma en el periodo 2020 a 2027, en la cual se genera una banda de valores donde el 90% de ellos está ente 0,47 USD/ton y 0,54 USD/ton, con un promedio de 0,50 USD/ton y desviación estándar 0,02 USD/ton.

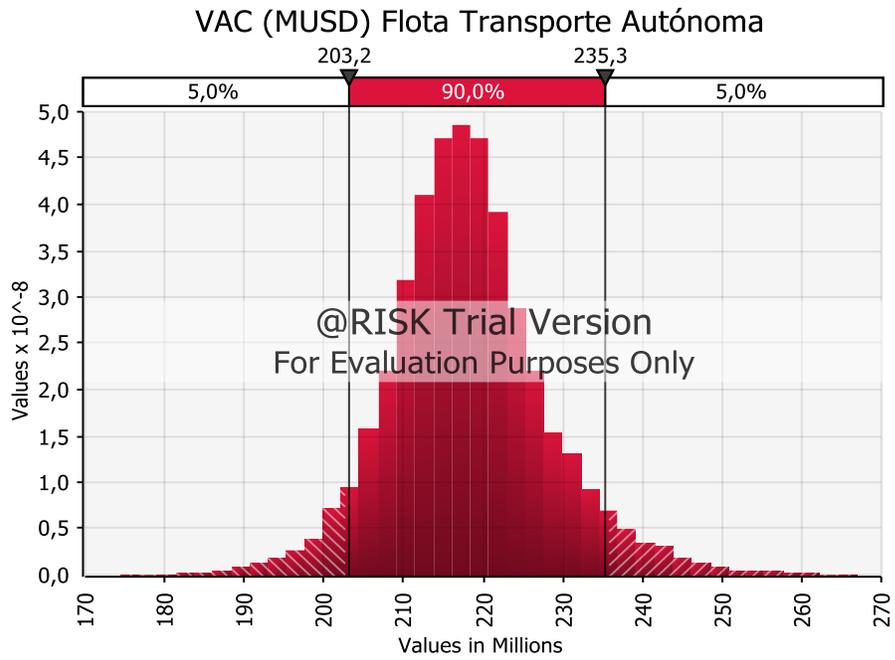


Figura 42 - Simulación de VAC de flota de transporte autónomo.
Fuente: Elaboración propia.

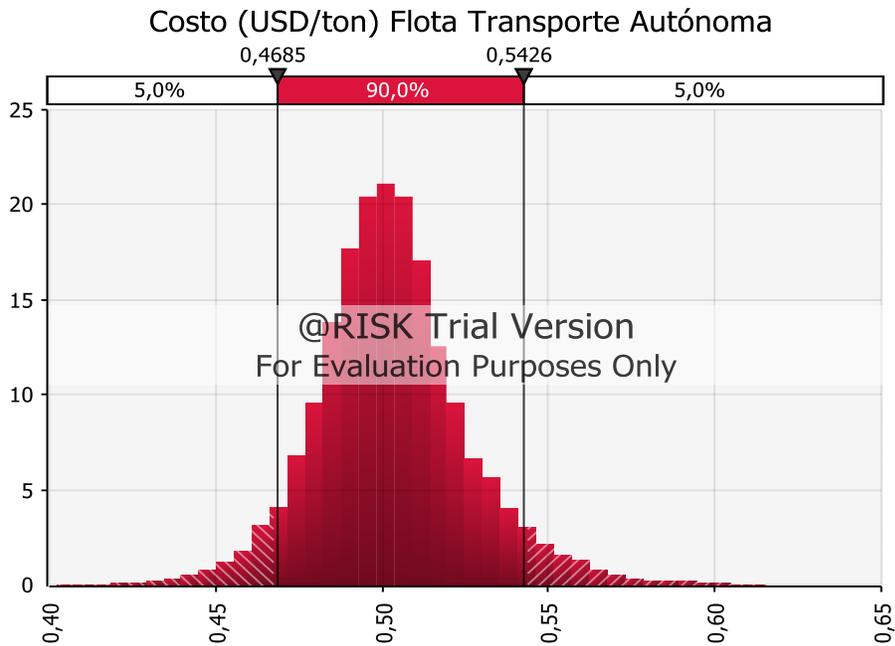


Figura 43 - Simulación de costo de transporte de flota autónoma.
Fuente: Elaboración propia.

La Figura 44, muestra una banda de valores de VAC de flota convencional, para la cual el 90% de las iteraciones se encuentra entre los 231,9 MUSD y 263,5 MUSD que tendría el operar con camiones convencionales, con una media de 246,4 MUSD y una desviación estándar de 10,0 MUSD durante el periodo de evaluación 2020 a 2027.

La simulación del costo promedio de transportar una tonelada mediante una flota de camiones convencionales se muestra en Figura 45, donde se obtuvo una banda de valores en la cual el 90% de los datos están entre 0,53 USD/ton y 0,61 USD/ton, con un promedio de 0,57 USD/ton y desviación estándar 0,02 USD/ton.

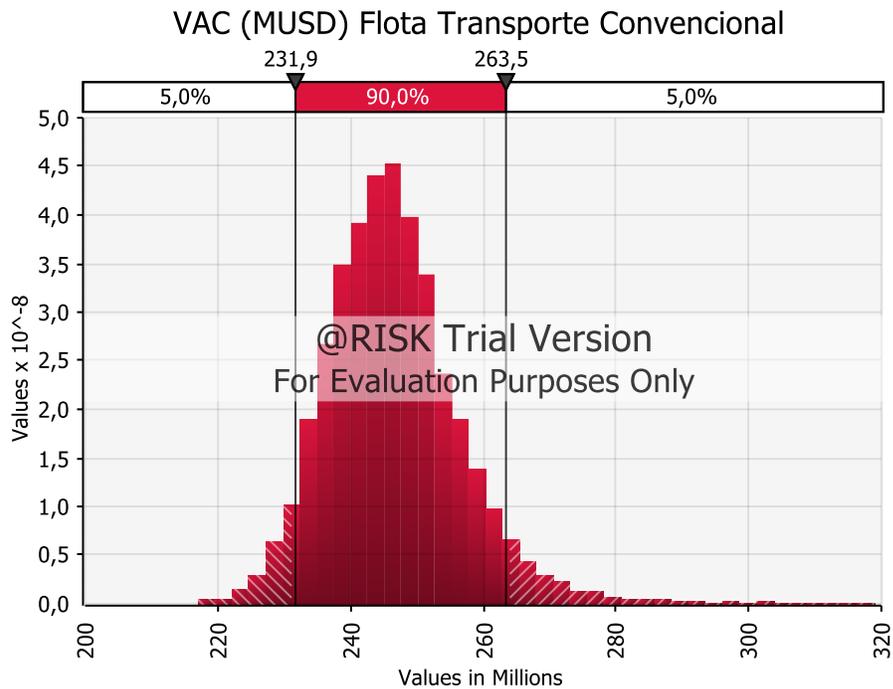


Figura 44 - Simulación de VAC de flota de transporte convencional.
Fuente: Elaboración propia.

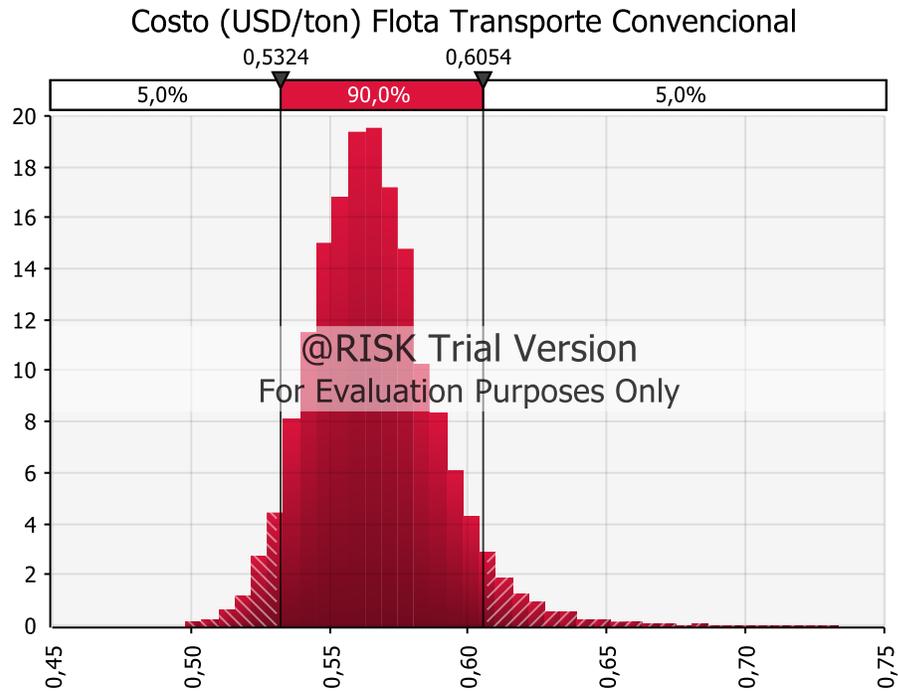


Figura 45 - Simulación de costo de transporte de flota convencional.
Fuente: Elaboración propia.

Análisis de sensibilidad

Análisis de sensibilidad de VAC

Al realizar la simulación del valor actual de costos para flota autónoma (véase Figura 46 - Distribución acumulada de simulación de VAC de flota de transporte autónomo), esta entrega un valor más probable en torno a los 218,08 MUSD, donde la mayor incidencia en su variabilidad está dada principalmente por el uso operativo y la UEBD de la flota de camiones autónomos, como se muestra en la Figura 47 - Tornado de simulación de VAC CAEX de flota de transporte autónomo.

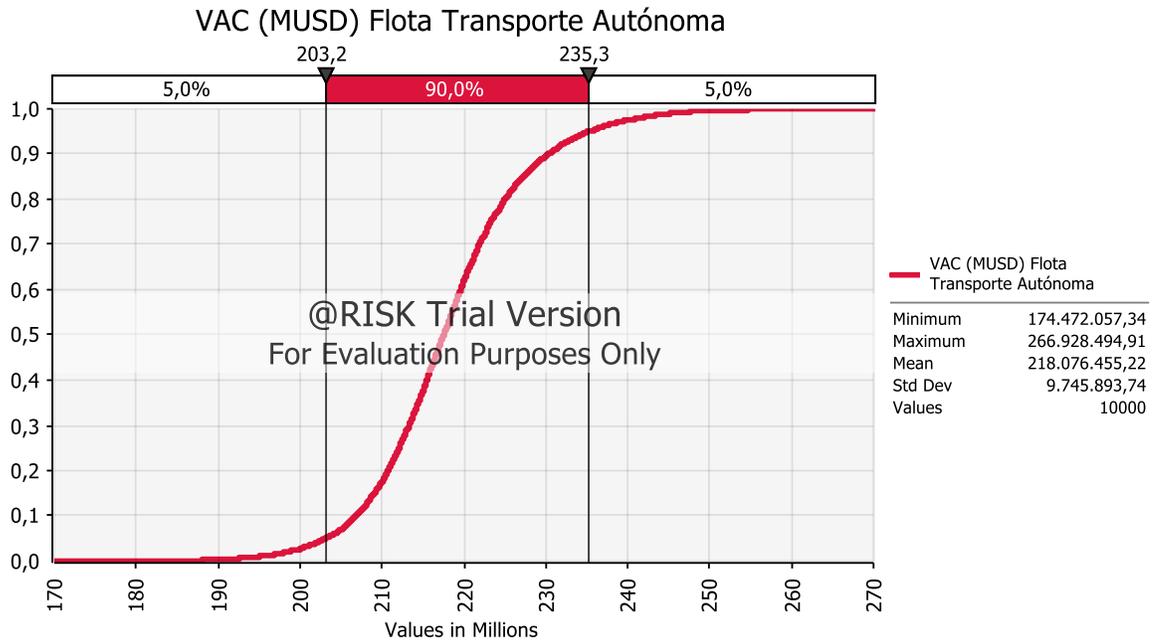


Figura 46 - Distribución acumulada de simulación de VAC de flota de transporte autónoma.
Fuente: Elaboración propia.

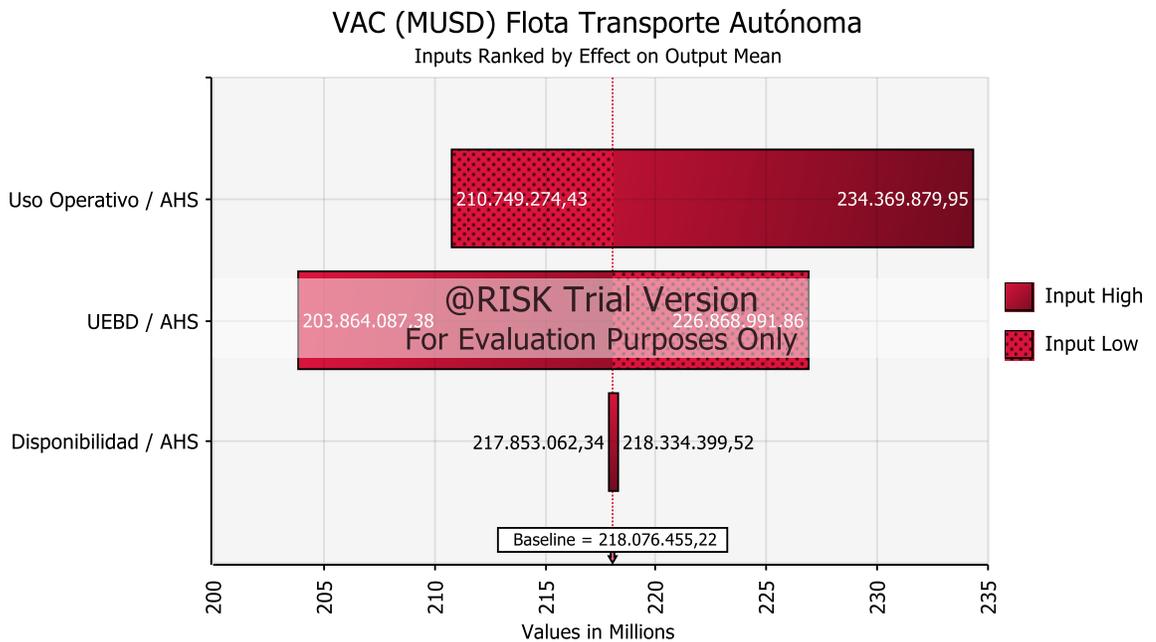


Figura 47 - Tornado de simulación de VAC de flota de transporte autónomo.
Fuente: Elaboración propia.

La misma simulación se realizó para el caex convencional, como se muestra en la Figura 48 - Distribución acumulada de simulación de VAC de flota de transporte convencional, donde se observó un valor esperado de 246,4 MUSD, para el cual se tiene que los indicadores operacionales que mas influyen en su variabilidad corresponden al Uso Operativo y la UEBD, como se muestra en Figura 49 - Tornado de simulación de VAC de flota de transporte convencional.

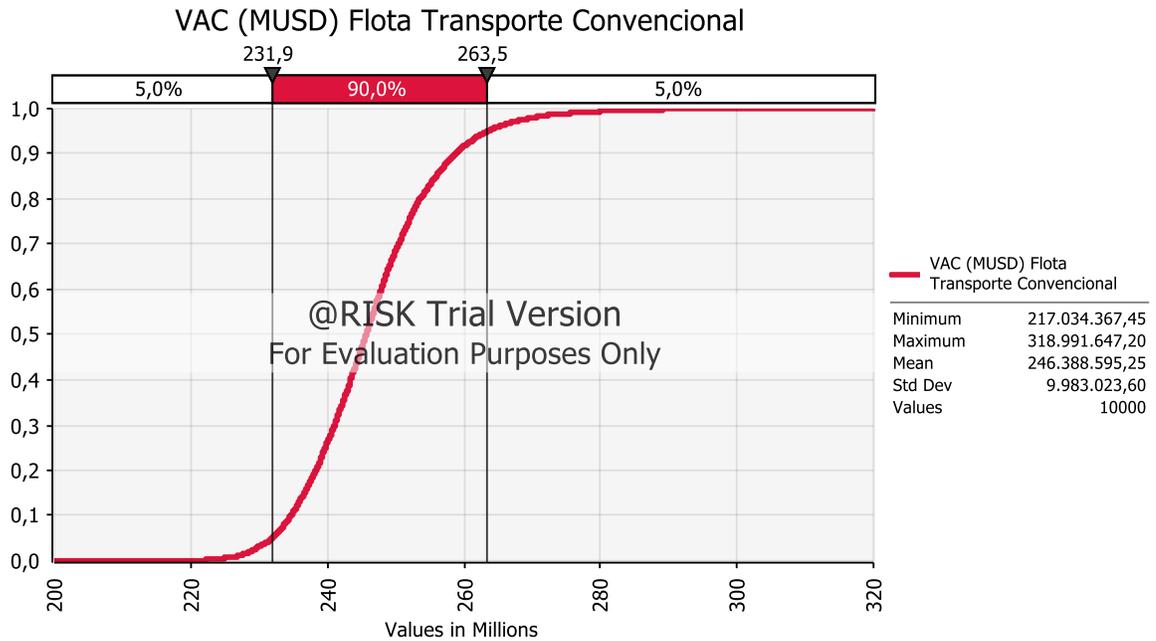


Figura 48 - Distribución acumulada de simulación de VAC de flota de transporte convencional.
Fuente: Elaboración propia.

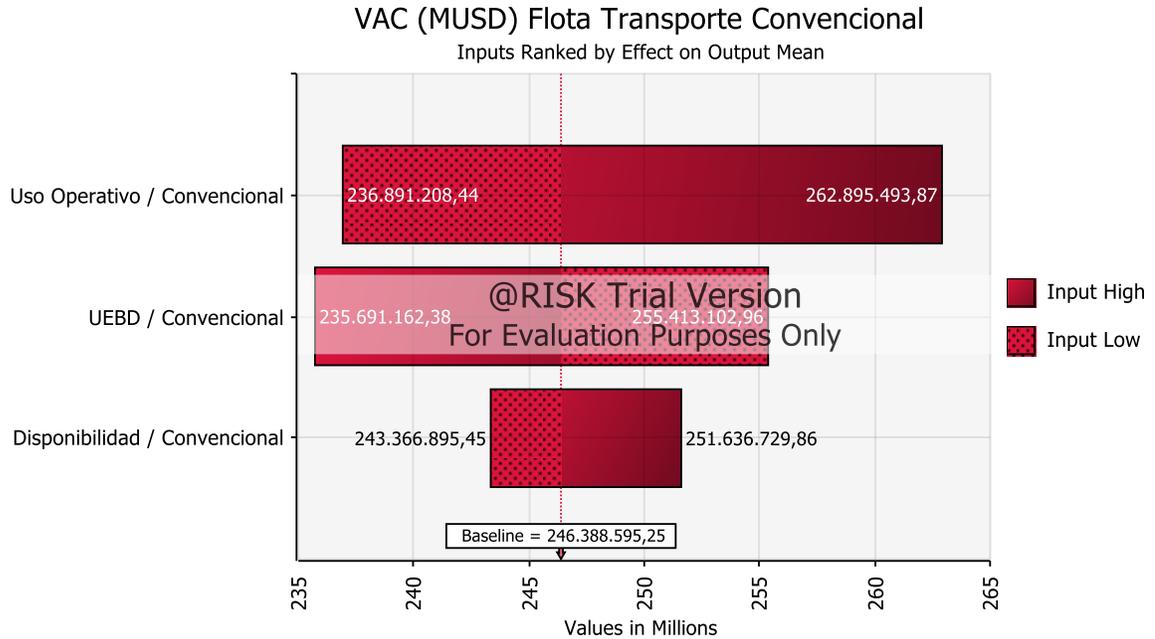


Figura 49 - Tornado de simulación de VAC de flota de transporte convencional.
Fuente: Elaboración propia.

Análisis de sensibilidad de costo de transporte

Al realizar la simulación costo de transporte para flota autónoma (véase Figura 50 - Distribución acumulada de simulación de costo de transporte de flota autónoma), esta entrega un valor esperado o más probable en torno a los 0,50 USD/ton, donde la mayor incidencia en su variabilidad está dada principalmente por el uso operativo y la UEBD de la flota de camiones autónomos, como se muestra en la Figura 51 - Tornado de simulación de simulación de costo de transporte de flota autónoma.

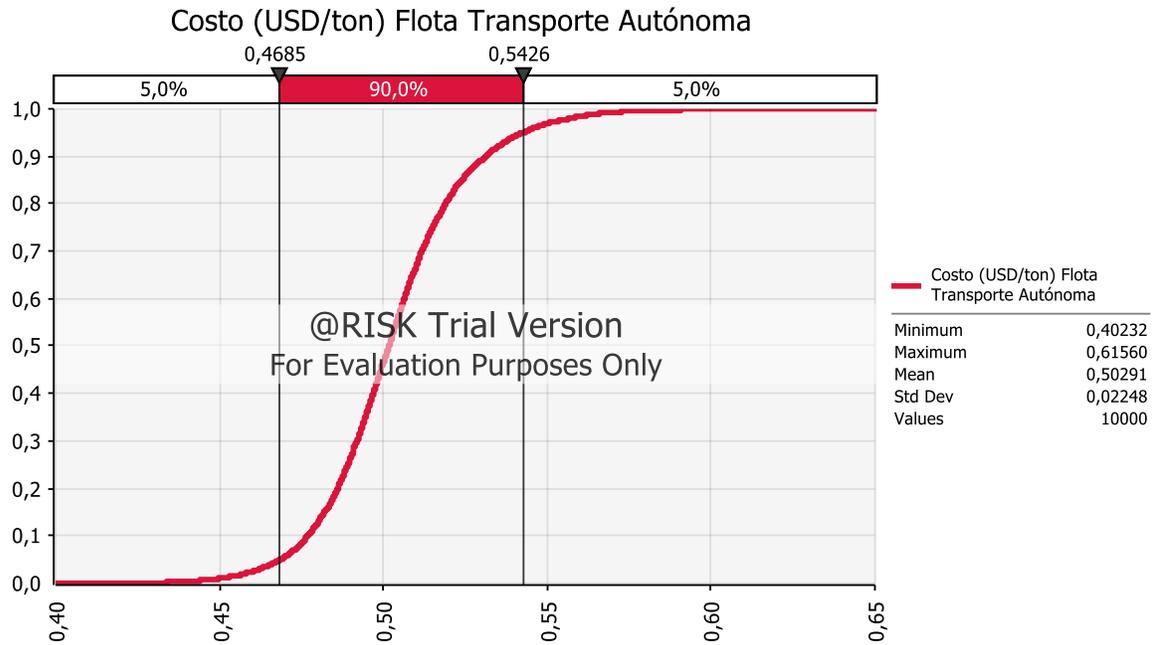


Figura 50 - Distribución acumulada de simulación de costo de transporte de flota autónoma.
Fuente: Elaboración propia.

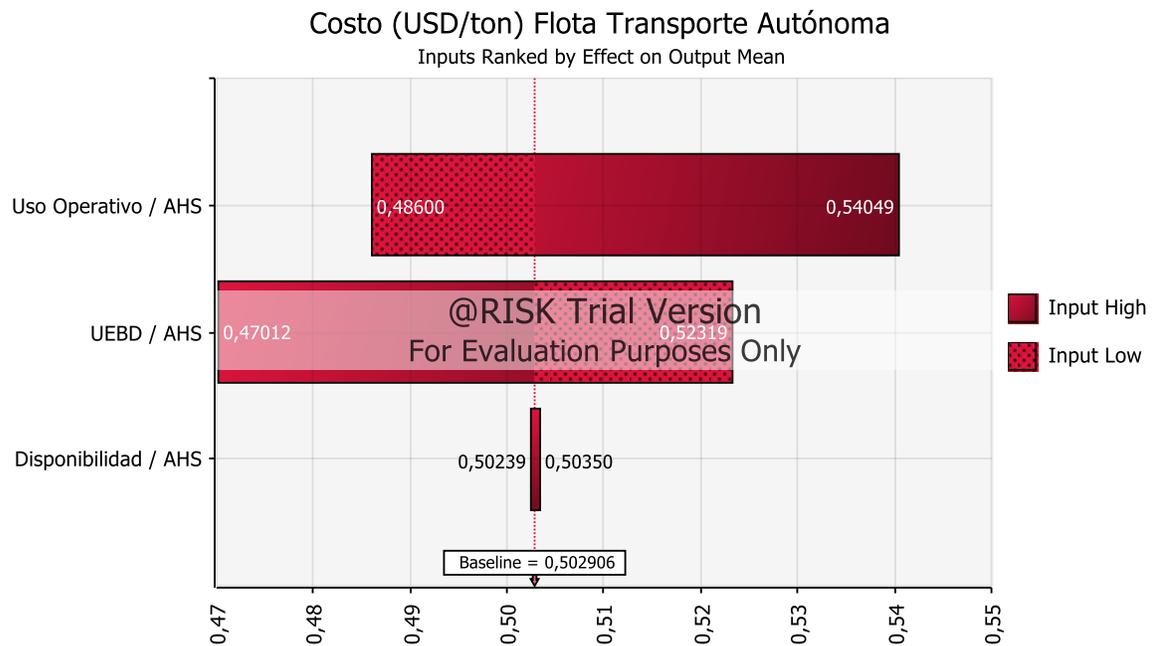


Figura 51 - Tornado de simulación de costo de transporte de flota autónoma.
Fuente: Elaboración propia.

Al realizar la simulación del costo para flota autónoma (véase Figura 52 - Distribución acumulada de costo de transporte de flota convencional), esta entrega un valor esperado o más

probable en torno a los 0,57 USD/ton, donde la mayor incidencia en su variabilidad está dada principalmente por el uso operativo y la UEBD de la flota de camiones autónomos, como se muestra en la Figura 53 - Tornado de simulación de costo de transporte de flota convencional.

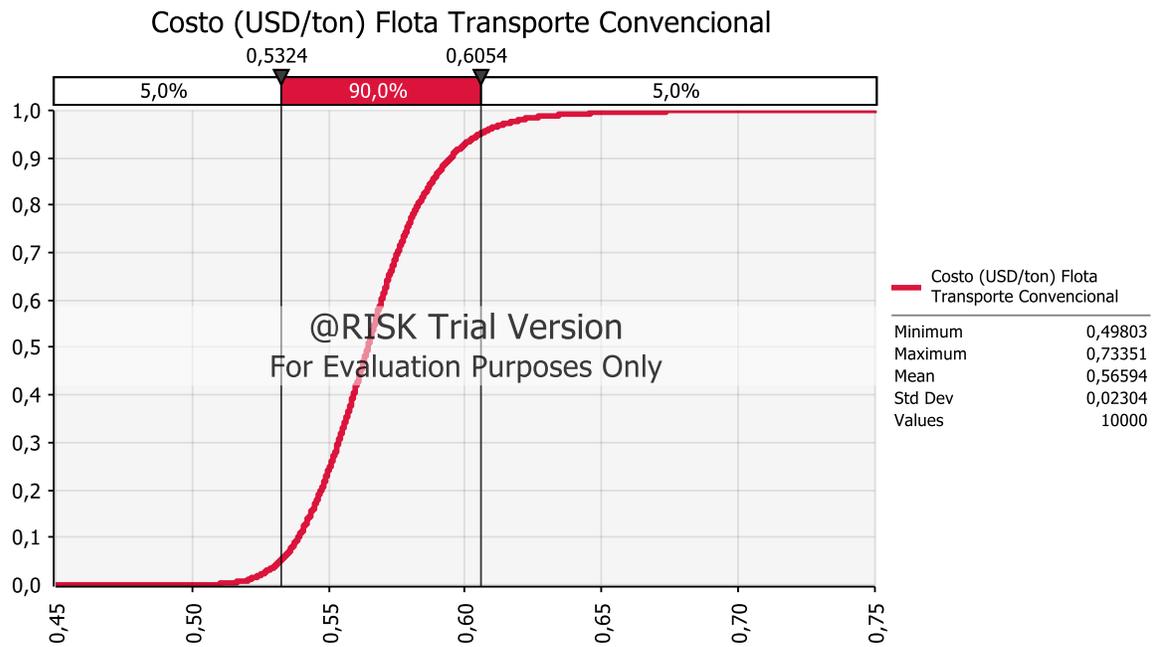


Figura 52 - Distribución acumulada de costo de transporte de flota convencional.
Fuente: Elaboración propia.

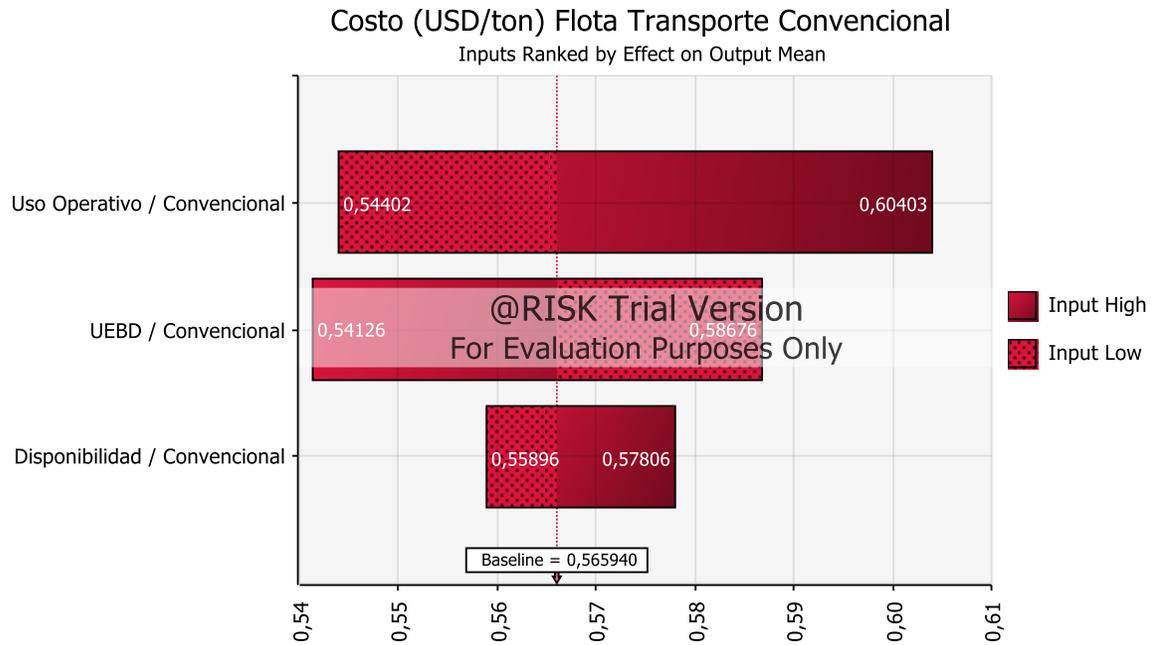


Figura 53 - Tornado de simulación de costo de transporte de flota convencional.
Fuente: Elaboración propia

5 CONCLUSIONES

A partir del estudio realizado fue posible determinar que la incorporación de tecnología en un proceso productivo además de reconocer las bondades operativas de la maquinaria es necesario cuantificar en un sentido económico la rentabilidad de ella debido a las características propias de cada faena minera donde se apliquen.

En lo particular, se determinó los principales costos que se deben considerar para la operación con una flota de camiones autónomos o convencionales, y como equipos de movimiento de tierra se relacionan o impactan en el resultado de la maquinaria en estudio.

En cuanto a los indicadores operacionales se identificó que el sistema de transporte autónomo presenta una mayor disponibilidad de equipos debido a menor tiempo en mantenimiento que el caso convencional, además de presentar un mayor uso operativo y mayor UEBD debido a que este sistema no requiere de operadores, por lo que se eliminan los tiempos de colación y cambio de turnos. Además, se determinó que este aumento en los indicadores operacionales tiene un impacto al momento de determinar la cantidad de equipos que deben componer la flota de transporte, por lo que en esta faena se requieren 18 camiones autónomos o 19 camiones convencionales

Luego de realizar el análisis de costo se obtuvieron los inputs económicos de la flota de vehículo autónoma y flota de vehículo convencional, para lograr determinar sus costos de transporte y el valor actual de costos por medio de la realización de un modelo de simulación en el software @Risk. A dicho modelo se agregó como variable el comportamiento de la disponibilidad, uso operativo y UEBD de camiones convencionales y autónomos, del cual se obtuvo una banda de valores esperados de costo de transporte y valor actual de costos para cada flota, donde para el caso de la flota de vehículo autónoma se obtuvo un costo de 0,50 USD/ton con una desviación estándar de 0,02 USD/ton y un costo de 0,57 USD/ton con desviación estándar de 0,02 USD/ton para la flota de vehículo convencional. En cuanto al VAC se obtuvo un valor esperado de 218,1 MUSD para la flota de vehículo autónoma, el cual representa un valor mucho menor comparado con los 246,4 MUSD esperados para la flota de vehículo convencional.

Sumado a los antecedentes generales en el desarrollo del análisis objeto de la tesis, a continuación se proporciona un conjunto de resultados adicionales obtenidos mediante evaluación analítica y simulación:

1. El estudio de disponibilidad, arrojó un +4 % más para el sistema de vehículo autónomo, de 86% sobre un 82% del sistema de vehículo convencional, dándole el beneficio al autónomo, por una variación porcentual. Las diferencias se deben a la mayor disponibilidad de equipos, sistemas convencionales y la baja mantención de estos.
2. El estudio de utilización efectiva, arrojó un +12% más para el sistema de vehículo autónomo, de 86% sobre un 77% del sistema de vehículo convencional, dándole el beneficio al AHS, por una variación porcentual. La diferencia es que el sistema autónomo permanece más tiempo en faena, dado los espacios del cambio de turno y la colación que solo existen en minería convencional, que disminuye su utilización
3. En términos de horas efectivas, el sistema de vehículo autónomo arrojó un valor de 16,5 horas promedio, aprox. 17 horas en un día, sobre el sistema de vehículo convencional de 13.7 horas, aprox. 14 efectivas, permitiendo al equipo de transporte, cumplir las funciones que se designaron, esto es lo que apalanca la utilización y viceversa, también incrementa el rendimiento de las toneladas movidas por hora efectivas.
4. El estudio de productividad, para los camiones convencionales, se ve en el rendimiento el resultando 507 Ton/Hr y por camión, para los camiones autónomos es de 678 Ton/Hr y por camión, hay una diferencia de 34% en favor del sistema autónomo.
5. El estudio del consumo de combustible evidenció un uso de 219 para Lt /hr el vehículo autónomo y 194 Lt/ hr para vehículo convencional. Existe una eficiencia del +12% a favor del sistema autónomo, ya que cuida el rendimiento frenando cuando corresponde, controlando las velocidades en pendientes y en plano.
6. El estudio de la duración de neumáticos, arrojó un estimado de 7923 horas, aproximadamente 8000 horas, al sistema autónomo, en cambio el sistema convencional promedio arrojó un estimado de 4881 horas, demostrando que en variación porcentual favorece al AHS del 64%, por tener una duración de vida útil promedio 3000 horas más que el convencional, un impacto positivo en términos de costos e insumos.
- 7.-En términos de mantenibilidad (MTTR) y confiabilidad (MTBF) el sistema autónomo mostró una eficiencia de +15% y +18%, respectivamente, respecto del sistema convencional
- 8.- En términos de factor de carga, el autónomo y el convencional permiten una carga similar relativa a 295 ton, sin embargo, la distribución de cargas es más homogénea en el AHS, debiéndose a la precisión al momento de posicionar en el carguío.

Fundamentado en los puntos anteriores descritos, el sistema basado en vehículo autónomo AHS es superior en múltiples aspectos al sistema convencional, demostrando técnicamente su viabilidad a través de esta investigación. En seguridad lo más importante a considerar es la exposición de menor cantidad de personas al riesgo de la operación.

Finalmente tras el análisis de los datos obtenidos es posible concluir que la flota de vehículo autónoma para la faena en estudio presenta un ahorro para el transporte de minerales, un aumento en sus disponibilidades, uso operativo y UEBD en relación con una flota de vehículo convencional.

No obstante los resultados establecidos de beneficio, en las condiciones actuales imperantes en los negocios, no se puede dejar de mencionar que la implementación de tecnología en industrias de decenas de años tiene un impacto en el entorno y en la sociedad muy significativo, ya que en rigor al implementar y masificar el uso de flota de vehículo autónoma para las faenas, existe una condición no analizada y que tiene relación al impacto en stakeholders sociales, donde habrá recurso humano que deberá ser movilizadado, será reemplazado y en múltiples casos significará la pérdida del empleo a raíz del proceso de automatización.

La industria minera se desarrolla entorno a una comunidad y en un entorno cultural particular, por lo que bien amerita su evaluación de impacto en ese sentido.

6 BIBLIOGRAFIA

- [1] E. Bozorgbrahim, R. Hall y G. Blackwell, «Sizing equipment for open pit mining-a review of critical parameters,» *Maney for the Institute of Materials, Minerals and Mining in association with AusIMM*, vol. Vol. 112, 2003.
- [2] O. Golbasi y K. Dagdelen, «Equipment Replacement Analysis of Manual Trucks with Autonomous Truck Technology in Open Pit Mines».
- [3] I. Piñeyro y J. Riquelme, «Análisis sistema de transporte autónomo (AHS) en División Gabriela Mistral (DGM), levantamiento modelo operacional autónomo,» Santiago, 2016.
- [4] J. Perreira, *An Interactive Simulation Model to Comparean Autonomous Haulage Truck System with a Manually-Operated System*, 2013.
- [5] Modular Mining Services, «¿Que es el sistema Dispatch?,» 2016.
- [6] A. Burgos Mardones, «Manual DGM-MN-009 Administracion y Operacion del Sistema Autonomo v 2.0.,» 2019.
- [7] A. Canelo y C. Aguilera, «10 años de operación autónoma en División Gabriela Mistral, Codelco. Presente y Futuro,» de *XV Congreso Internacional Expomin*, Santiago, 2018.
- [8] J. Banks, «Introduction to Simulation,» de *Winter Simulation Conference*, Atlanta, GA 30067, U.S.A., 1999.
- [9] E. García Dunna, H. García Reyes y L. E. Cárdenas Barrón, *Simulación y Análisis de Sistemas con ProModel*, México: Pearson Educación, 2006.

- [10] J. Mun, Modelling risk, applying monte carlo simulation, real options analysis, forecasting, and optimization techniques, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, 2006.
- [11] I. Pedrosa, A. Robles, J. Juarros, J. Basteiro y E. García, «Pruebas de bondad de ajuste en distribuciones simétricas, ¿qué estadístico utilizar?.,» Bogotá, Universitas Psychologica, 2015, pp. V.14 (1) 245-254.
- [12] Rasool, Ahmad y Arshad, «Anderson Darling and Modified Anderson Darling Tests for Generalized Pareto Distribution,» *Journal of Applied Sciences*, vol. 3, pp. 85-88, 2003.
- [13] H. Akaike, «Fitting Autoregressive Models for Prediction,» Tokyo, Annals of institute of statistical mathematics, 1969, pp. 243-247.
- [14] E. Nebot, «Surface Mining: Main Research Issues for Autonomous Operations.,» *Springer*, pp. 268-280, 2006.

7 ANEXOS

Detalle por gasto anual en operador

Tabla 16 - Gasto anual en operadores

Fuente: Dueño del proyecto no autoriza nombre de la fuente.

Ítem	USD/año
Complementos Licencias Médicas Rol B	\$ 603
RB Aporte Trabajo Pesado Ley 19404	\$ 765
RB-Asignación de Movilización y Colación	\$ 1.354
RB-Asignación de Zona	\$ 6.174
RB-Asignación y Bonos Varios	\$ 16.048
RB-Bono de Gestión	\$ 6.335
RB-Bono de Producción	\$ 4.460
RB-Bono Faena Continua	\$ 5.012
RB-Bono Negociación Colectiva	\$ 6.385
RB-Contratos a Plazo Fijo	\$ 1.411
RB-Leyes Sociales	\$ 358
RB-Provisión Gratificación	\$ 4.197
RB-Provisión Indemniz. Años de Servicios	\$ 2.096
RB-Seguro cesantía L.ey 19.728	\$ 1.135
RB-Sobretiempo	\$ 720
RB-Sueldo Base	\$ 19.557
RB-Vacaciones	\$ 1.111
Total general	\$ 77.722

Cálculo de quipos

El cálculo de la cantidad de equipos que deben componer las flotas autónoma y convencional, se realizó de la siguiente manera:

- 1- Cálculo de tiempo Nominal por camión en el año:

$$Tiempo\ Nominal\ \left(\frac{h}{año}\right) = Dias\ en\ el\ año \times 24\ horas \quad (8)$$

- 2- Cálculo de tiempo Efectivo por camión en el año:

$$Tiempo\ operativo\ \left(\frac{h_{op}}{año}\right) = Tiempo\ nominal \times UO \times Disponibilidad \quad (9)$$

- 3- Numero de ciclos realizado por camión en el año:

$$N^{\circ}\ de\ ciclos\ por\ camion = \frac{Tiempo\ operativo\ en\ el\ año\ por\ camion}{tiempo\ de\ ciclo\ del\ camion} \quad (10)$$

4- Tonelaje transportado por camión en el año:

$$\text{Tonelaje por camion (ton/año)} = \text{N}^\circ \text{ de ciclos por camion} \times \text{factor de carga} \quad (11)$$

5- Numero de camiones por año:

$$\text{N}^\circ \text{ de camiones} = \frac{\text{tonelaje requerido a mover en el año}}{\text{tonelaje movido por un camion en el año}} \quad (12)$$

Cálculo de consumos por flota

Cálculo de consumo en combustible

Considerando los inputs económicos de consumo de combustible según el perfil de transporte y estado en que se encuentren, subiendo cargado, bajando vacío, horizontal cargado u horizontal vacío se calcularon los litros utilizados en cada perfil, según la ecuación 13.

$$\text{Litros en perfil (lt)} = \text{tiempo en perfil (h)} \times \text{Consumo en perfil (lt/h)} \quad (13)$$

Cálculo de consumo de neumáticos

El cálculo de neumáticos requeridos por año se realizó considerando las horas operativas de cada flota y las horas de duración de neumáticos para camiones autónomos y para camiones convencionales como se muestra en ecuación 14.

$$\text{N}^\circ \text{ de neumaticos} = \frac{\text{tiempo operativo de la flota(h)}}{\text{horas de duracion de neumatico}} \times 6 \quad (14)$$

Cálculo de consumo de lubricantes

El consumo de lubricanes se calculó considerando las horas operativas de las flotas, las horas de cambio del lubricante y los litros a cargar en cada cambio como se muestra en la ecuación 15.

$$\text{Litros de lubricante (lt)} = \frac{\text{tiempo operativo de la flota(h)}}{\text{horas de dcambio lubricante(h)}} \times \text{litros a cargar (lt)} \quad (15)$$

Esta operación se realizó para el cálculo de lubricante de motor, lubricante hidráulico y lubricante para motor de tracción, tanto para la flota autónoma como la flota convencional.

En la Tabla 17 y Tabla 18, se muestran los consumos de lubricante calculados para flota autónoma y flota de camiones convencionales respectivamente.

Tabla 17 - Consumo de lubricantes de flota de transporte autónoma
Fuente: Elaboración propia

AHT	Unidad	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027
Motor	lt	57.969	59.267	59,161	58.051	59.040	60.055	60.091	60.459
Hidráulico	lt	68.838	70.380	70.259	68.936	70.110	71.316	71.359	71.795
Motor Tracción	lt	7.867	8.043	8.030	7.878	8.013	8.150	8.155	8.205

Tabla 18 - Consumo de lubricantes de flota de transporte convencional
Fuente: Elaboración propia

Convencional	Unidad	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027
Motor	lt	57.431	58.744	58.722	57.029	58.268	59.718	59.701	60.090
Hidráulico	lt	68.199	69.758	69.733	67.722	69.620	70.915	70.895	71.357
Motor Tracción	lt	7.794	7.972	7..969	7.740	7.957	8.105	8.102	8.155

Cálculo de operadores

Para el caso del camión convencional se debe contar con operadores, para calcular la cantidad de operadores la faena minera propone un factor dotacional de 4,7 operadores por equipo. Así la cantidad de operadores se calculó según la ecuación 16.

$$N^{\circ} \text{ de operadores} = 4,7 \times N^{\circ} \text{ de camiones} \quad (16)$$

Gastos anuales de flota autónoma y flota convencional

Según los consumos de insumos operacionales, requerimientos de operadores, contrato por servicio autónomo y los servicios de equipos de movimiento de tierra se calcularon los gastos anuales para la flota autónoma y flota convencional como se muestra en Tabla 19 y Tabla 20.

Tabla 19 - Gasto anual flota autónoma
Fuente: Elaboración propia

Flota autónoma	Unidad	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027
Lubricantes	MUSD	0,27	0,28	0,27	0,27	0,27	0,28	0,28	0,28
Neumáticos	MUSD	3,26	3,40	3,35	3,35	3,45	3,49	3,49	3,53
Combustible	MUSD	11,51	11,57	11,59	11,51	11,61	11,66	11,80	11,83
Mantenimiento	MUSD	12,83	13,04	13,02	12,85	13,00	13,16	13,17	13,23
Equipos apoyo	MUSD	3,42	3,41	3,38	3,36	3,41	3,41	3,41	3,41
Contrato autónomo	MUSD	6,16	6,16	6,16	6,16	6,16	6,16	6,16	6,16

Tabla 20 - Gasto anual flota convencional
Fuente: Elaboración propia

Flota convencional	Unidad	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027
Lubricantes	MUSD	0,27	0,27	0,26	0,26	0,27	0,28	0,28	0,28
Neumáticos	MUSD	5,49	5,72	5,64	5,54	5,81	5,89	5,89	5,93
Combustible	MUSD	11,97	12,26	12,07	11,89	12,10	12,17	12,30	12,33
Mantenimiento	MUSD	13,84	14,07	14,06	13,77	14,05	14,24	14,23	14,30
Equipos apoyo	MUSD	2,89	2,88	2,85	2,83	2,88	2,88	2,88	2,88
Remuneraciones	MUSD	6,94	6,94	6,94	6,94	6,94	6,94	6,94	6,94