



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE MINAS

IMPACTO ECONÓMICO DE LA IMPLEMENTACIÓN DE EQUIPOS  
ROBÓTICOS Y TELEOPERADOS EN LA MINERÍA A CIELO ABIERTO

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGISTER EN MINERÍA

OLESYA DASHAVSKAYA

PROFESOR GUÍA:  
JOSÉ CHARANGO FERNANDO MUNIZAGA ROSAS

PROFESOR CO-GUÍA:  
CRISTIAN IVÄN ESPINOZA CAMUS

MIEMBROS DE COMISIÓN  
DAVID GONZALO VARGAS NUÑEZ  
BRIAN KEITH TOWNLEY CALLEJAS

SANTIAGO DE CHILE  
2021

RESUMEN DE LA TESIS PARA OPTAR  
AL GRADO DE: MAGISTER EN MINERÍA  
POR: OLESYA DASHAVSKAYA  
FECHA: OTOÑO 2021  
PROFESOR GUÍA: JOSÉ CHARANGO MUNIZAGA-ROSAS

## IMPACTO ECONÓMICO DE LA IMPLEMENTACIÓN DE EQUIPOS ROBÓTICOS Y TELEOPERADOS EN LA MINERÍA A CIELO ABIERTO

En este trabajo se presenta un estudio del impacto económico de la implementación de equipos robóticos y teleoperados en la minería a cielo abierto. El estudio es realizado para tres casos diferentes: implementación de tecnología robótica para camiones mineros, robotización de plataforma de perforación y robotización del ferrocarril.

La hipótesis inicial de este trabajo es que, con el reequipamiento técnico de la flota de camiones para la mina elegida en este estudio, es que existen varias fuentes potenciales de efecto técnico debido a las cuales será posible aumentar la productividad y reducir los costos.

En el primer capítulo se presenta un marco teórico con todos los conceptos necesarios para entender el desarrollo de la tesis. Como objetivos principales se planteó la definición de los factores principales para aumentar la eficiencia de las operaciones mineras mediante la implementación de equipos autónomos; propuesta de una metodología para medir el impacto económico del uso de sistemas robóticos en minas a cielo abierto; comparación de los indicadores económicos del método remoto con el método estándar de operación.

En el segundo capítulo se presenta el análisis de las tecnologías de control manual, sistemas semiautónomos y autónomos en el mercado, se realiza el análisis comparativo de las tecnologías autónomas destacados en mercado y los costos aproximados.

En el tercer capítulo se presenta la información general del objeto de estudio, el complejo minero de materias primas de mineral de hierro. Se describe la metodología de diagnóstico realizado para el estudio de caso. Se indican los datos utilizados como inputs para realizar el análisis y las restricciones definidos para la integración del sistema autónomo.

Posteriormente, en el cuarto capítulo se analizan los componentes del sistema autónomo implementado para luego, en el capítulo cinco, definir los indicadores impulsores esperados de la eficiencia económica de la implementación de los sistemas autónomos para los casos estudiados y evaluar los costos esperados (capítulo seis).

Finalmente, se obtienen los valores estimados de los indicadores del impacto económico para evaluar el sistema autónomo implementado (capítulo siete), para el análisis de los cuales se aplica el método Montecarlo (capítulo ocho), lo que permite obtener los resultados finales, y presentar las conclusiones para tres casos estudiados.

## **Abstract**

The purpose of this thesis is to investigate the economic impact of the implementation of the autonomous and remote operated equipment in open pit mining. The study is conducted for three different cases: implementation of autonomous technology for mining trucks, robotization of the drilling rig and the railway automation.

The hypothesis of this thesis is that for the chosen case study, there are several potential sources of technical effects, which allow to increase productivity and reduce costs.

The first chapter presents the introduction of the study, which consists of the theoretical framework, statement of the problem, main concepts, objects, scope and definition of key terms. Also, in the first chapter is proposed the methodology of measurement of the economic impact by comparing the automated approach with the conventional method of use of equipment.

The second chapter contains the comparative analysis of the main manual control technologies, semi-autonomous and autonomous systems, highlighting the main companies and technologies presented in the market and indicating the main costs.

The third chapter presents the general information on the case study chosen for this thesis, which is a Mining and Beneficiation Plant, one of the main world producers of the iron ore concentrate. This chapter emphasizes the diagnostic of the mine and the used data as inputs for the analysis and the definition of restrictions for implementation of the autonomous systems.

Further, in the fourth chapter, the components of the autonomous systems to be implemented are analyzed. In chapter five, the expected efficiency drivers are defined.

The chapter six contains the expected cost evaluation for the whole set of technologies proposed for the case study: autonomous trucks, autonomous drill and automated railway.

In the final part of this work, the estimated values of the economic impact indicators are obtained to evaluate the implemented autonomous system (chapter seven). For the uncertainties treatment, the Monte Carlo method is applied (chapter eight), which allows to obtain the results and formulate the conclusions and recommendations for the three studied cases.

## **Благодарственное слово**

Прежде всего выражаю свою искреннюю признательность Народицкому Александру Геннадьевичу, основателю и генеральному директору компании *ООО «НПО «СПбЭК»*, а также Иконникову Степану Валерьевичу, генеральному директору компании *ООО «СПбЭК Майнинг»*. Именно они вдохновили меня на переезд в Чили, поддержали меня в стремлении реализовываться в профессиональной сфере, а также обучиться по программе «Горное дело» в Чилийском Государственном Университете и получить степень Магистра. Эта возможность, безусловно, дала мне многое как в социально-культурном плане, так и в профессиональном и личностном развитии.

Я благодарю мою семью: моих родителей, сестру и любимых племянников Арину и Ивана за всю любовь и поддержку, которую они мне оказывали на протяжении учебного процесса.

Также я бы хотела выразить благодарность Маурисио Фуэнтесу, который мне оказал неоценимую помощь в процессе обучения и редактировании данной работы.

В заключение хочу сказать спасибо моему дипломному руководителю Хосе Чаранго Мунисага Росас за его терпеливую поддержку от начала до конца.

## **Agradecimientos**

Ante de todo, agradezco a Aleksandrs Narodickis, Fundador y CEO de la empresa SPBEC, y Stepan Ikonnikov, CEO de la empresa SPBEC-Mining, quienes fueron los inspiradores para dar un giro de 180° a mi vida, mudarme a Chile, entrar al Programa de Magíster en Minería y concluir este estudio.

Quisiera agradecer a mis padres, hermana y sobrinos Arina e Ivan, por todo el apoyo que me brindaron y brindan siempre. Les agradezco por creer en mí, siendo los pilares fundamentales para la elaboración de este trabajo.

Quiero dar gracias a mi Sismólogo, Mauricio Fuentes, que ha sido parte de todo mi desarrollo universitario celebrando conmigo cada uno de mis pequeños triunfos y dando el apoyo en cada tropiezo.

Agradezco a mi profesor guía José Charango Munizaga Rosas por haberme brindado conocimiento y apoyo para cada consulta que tuve y apoyarme pacientemente de principio a fin.

## Tabla de contenido

1.	Introducción.....	1
1.1	Objetivos generales .....	1
1.2	Objetivos específicos.....	1
1.3	Hipótesis.....	1
1.4	Alcances .....	1
1.5	Definiciones .....	2
2.	Análisis de las tecnologías de control manual, sistemas semiautónomos y autónomos en el mercado .3	
2.1	Tecnologías de automatización para los camiones mineros.....	3
2.1.1	Tecnologías de control remoto o sistemas semiautónomas para los camiones mineros .....	3
2.1.2	Tecnologías autónomas para los camiones mineros.....	4
2.1.3	Análisis comparativo de las tecnologías autónomas destacados en mercado .....	9
2.2	Tecnologías de automatización para las perforadoras.....	11
2.2.1	Tecnologías de control remoto o sistemas semiautónomas para las perforadoras .....	11
2.2.2	Análisis comparativo de las tecnologías autónomas destacadas en mercado.....	12
2.3	Tecnologías de automatización para los ferrocarriles .....	13
2.3.1	Tecnologías de control remoto o sistemas semiautónomas para los ferrocarriles.....	13
2.3.2	Análisis comparativo de las tecnologías autónomas destacadas en mercado.....	15
3.	Información general del objeto de estudio .....	16
3.1	Información general de la mina.....	16
3.1	Metodología de diagnóstico realizado para el estudio de caso.....	16
3.2	Los datos utilizados como inputs para realizar el análisis.....	17
3.2.1	Flota de camiones mineros .....	17
3.2.2	Perforadoras .....	18
3.2.3	Ferrocarriles .....	19
3.3	Diagnóstico de la preparación técnica de la mina para el cambio operacional .....	21
3.4	Restricciones para la integración del sistema autónomo .....	23
4.	Los componentes del sistema autónomo implementado .....	24
4.1	Componentes del sistema autónomo para la flota de camiones .....	24
4.2	Componentes del sistema autónomo para las perforadoras.....	25
4.3	Componentes del sistema autónomo para los ferrocarriles .....	28
4.4	Metodología del proceso de implementación.....	32

4.5	Factores de riesgo principales relacionados con implementación de robots .....	33
5.	Los indicadores impulsores esperados de la eficiencia económica de la implementación del sistema autónomo.....	35
5.1	Perforadoras .....	40
5.2	Ferrocarriles .....	43
6.	Estimación de costos esperados para la creación del sistema robótico .....	46
6.1	Flota de camiones mineros autónomos .....	46
6.2	Perforadora autónoma .....	47
6.3	Ferrocarril autónomo.....	47
7.	Indicadores del impacto económico para evaluar el sistema autónomo implementado .....	49
7.1	Metodología de análisis económico aplicada.....	49
7.2	Camiones autónomos .....	50
7.3	Perforadora autónoma .....	52
7.4	Ferrocarril autónomo.....	54
8.	Montecarlo.....	57
9.	Conclusiones y sugerencias .....	61
9.1	Conclusiones .....	61
9.2	Comparación de los resultados esperados de la creación con los equipos robóticos con los objetivos y criterios establecidos.....	61
9.3	Sugerencias.....	62
	BIBLIOGRAFÍA.....	65

# **1. Introducción**

El análisis de los sistemas existentes y las tendencias de desarrollo en tecnologías de control para el transporte minero ha demostrado que hoy en día la robotización y digitalización de los procesos mineros tienden a ser la prioridad para la minería a cielo abierto, minimizando el impacto de un factor humano variable y excluyendo a las personas de las áreas de alto riesgo (Bellamy et al, 2010).

En las practicas mundiales ya se utilizan ampliamente las tecnologías robóticas desde prototipos hasta soluciones integradas.

Sin embargo, existen varias barreras, tales como regulación gubernamental del país, escepticismo sobre un nuevo enfoque que afecta a muchos procesos operativos establecidos, costo de solución, necesidad de un cambio gradual, los cuales afectan a un desarrollo tecnológico de minería a cielo abierto.

## **1.1 Objetivos generales**

El objetivo general de este trabajo es la definición de los factores principales para aumentar la eficiencia de las operaciones mineras mediante la implementación de equipos autónomos; propuesta de una metodología para medir el impacto económico del uso de sistemas robóticos en minas a cielo abierto; comparación de los indicadores económicos del método remoto con el método estándar de operación.

## **1.2 Objetivos específicos**

- Analizar las tendencias en el desarrollo de tecnologías de transporte automatizadas para la minería a cielo abierto;
- Describir los fundamentos de los sistemas robóticos y teleoperados, sus principios científicos y metodológicos y etapas de la implementación;
- Evaluación de los parámetros de la eficiencia económica del uso de las tecnologías autónomas.
- Validación del comportamiento de los parámetros de eficiencia definidos por medio de los casos de estudio.

## **1.3 Hipótesis**

La hipótesis inicial de este trabajo es que, con el reequipamiento técnico de la flota de camiones para la mina elegida en este estudio, es que existen varias fuentes potenciales de efecto técnico debido a las cuales será posible aumentar la productividad y reducir los costos.

## **1.4 Alcances**

Tomando en cuenta el factor de accesibilidad a la información, este estudio se centra principalmente en la implementación de las tecnologías autónomas para la minería a cielo abierto por medio de camiones, plataformas de perforación y ferrocarril autónomos. Por consiguiente, no se considerarán las tecnologías automatizadas para los procesos que no sean de perforación y transporte, ni tampoco sistemas automatizados para la minería subterránea.



## 1.5 Definiciones

La automatización es parte de un movimiento industrial más amplio, a menudo denominado la cuarta revolución industrial o Industria 4.0, que también incluye robótica, inteligencia artificial (IA) e *Internet of Things*. Este movimiento está marcado por la integración e interconexión tecnológica, que puede mejorar la eficiencia y la productividad del ciclo. A lo largo de este ciclo, el acceso en tiempo real a la información está impulsado por el continuo y cíclico flujo de información y acciones entre los mundos físicos y digitales. Este flujo tiene lugar a través de una serie de pasos iterativos conocido como PDP – por sus siglas en inglés *physical-to-digital-to-physical* (Cotteleer et al.,2017; Mc Nab et al., 2011):

- *Physical-to-digital*: se captura la información del mundo físico y se crea un registro digital de la misma.
- *Digital-to-digital*: en este paso, la información se comparte y se interpreta utilizando analítica avanzada, análisis de escenarios e inteligencia artificial para descubrir información relevante.
- *Digital-to-physical*: se aplican algoritmos para traducir las decisiones del mundo digital a datos efectivos, estimulando acciones y cambios en el mundo físico.

Debido a que esta tesis trata con conceptos y procesos operacionales donde los términos específicos a menudo varían dependiendo de país, esta lista identifica los términos y las definiciones que se basan en un lenguaje estándar descrito en ISO17757:2017 (Organización Internacional de Normalización, 2017a) y el Código de Prácticas de Australia Occidental para la Minería Autónoma Segura (Gobierno de Australia Occidental, Departamento de Minas y Petróleo, Seguridad de los Recursos, 2015):

*Automático* - un proceso o parte de un proceso cuando una máquina sigue reglas bien definidas.

*Autónomo* - un proceso o maquinaria que está destinada a realizar tareas dentro de un conjunto de operaciones definidas sin intervención humana o control directo.

*Operación manual* - una operación donde un humano tiene el control del equipo. Esto puede ser tripulado o control remoto.

*Control remoto* - un tipo de operación donde la funcionalidad y la interfaz del operador son iguales o similares en la máquina, pero el control está separado de la máquina y está bajo supervisión humana mientras la máquina funciona en modo de línea de visión o de forma teleoperada.

## **2. Análisis de las tecnologías de control manual, sistemas semiautónomos y autónomos en el mercado**

Los primeros camiones mineros de más de 100 toneladas de capacidad aparecieron a finales de la década de los 60 y empezaron a denominarse “fuera de carretera” (*off the road*).

Los niveles asignados a los equipos de minería se basan en la clasificación descrita en la taxonomía SAE International (2018) de Términos de automatización de conducción y adaptados para aplicar a la automatización minera utilizando la terminología estándar de ISO17757: 2017 (Organización Internacional de Normalización, 2017a):

- Nivel 0: Sin automatización - el equipo se opera completamente de forma manual. El operador ejecuta todas las tareas.

- Nivel 1: Asistencia del operador - el sistema tiene algunas funciones automatizadas específicas de la función. El operador mantiene el control durante toda la tarea.

- Nivel 2: Semiautónomo - el sistema realiza una parte de sus tareas de forma autónoma dentro de operaciones definidas sin intervención humana o control directo. El operador realiza otras tareas. El control remoto a menudo está considerado en este nivel, aunque no sea necesario.

- Nivel 3: Condicionalmente autónomo - el sistema puede completar operaciones sostenidas de forma autónoma en un área autónoma designada. Tiene capacidades de conciencia de la situación y entra en un estado de bloqueo cuando se requiere la intervención. Un operador / supervisor autónomo puede detener el sistema en cualquier momento y debe estar disponible para operarlo manualmente si sea necesario.

- Nivel 4: Altamente autónomo - el sistema puede completar operaciones sostenidas de forma autónoma en un área autónoma designada y tiene capacidad de realizar el análisis operativo de la situación. El sistema puede intervenir en situaciones de riesgo mínimo. En situaciones de mayor riesgo, entra en un estado detenido. El operador / supervisor autónomo puede solicitar al sistema que se bloquee.

- Nivel 5: Totalmente autónomo - el sistema puede completar operaciones sostenidas de forma autónoma con y sin un área autónoma designada y tiene capacidades de análisis operativo de la situación. El sistema puede intervenir en situaciones de riesgo mínimo. En situaciones de mayor riesgo, entrará en un estado detenido. El operador / supervisor autónomo puede solicitar que el sistema se desconecte.

Resumiendo lo dicho anteriormente, los niveles 0–1 son manuales, porque todavía son guiados de forma manual continua. El nivel 2 es semiautónomo con un nivel variable de control por parte del operador. Los niveles 3–5 son autónomos porque el sistema realiza un trabajo continuo.

### **2.1 Tecnologías de automatización para los camiones mineros**

#### **2.1.1 Tecnologías de control remoto o sistemas semiautónomas para los camiones mineros**

- Remote Control Technologies Pty Ltd (RCT), Master Control®

Uno de los fabricantes importantes de los sistemas remotos para minería es una empresa australiana *Remote Control Technologies Pty Ltd* (RCT). Su gama Master Control® proporciona control dentro de la línea de visión y puede adaptarse para cualquier tipo de equipo de minería (camiones mineros, dozers, excavadores, perforadoras, cargadores y equipos auxiliares).

Este sistema proporciona dos modos básicos de operación:

- Control remoto dentro de la línea de visión: la máquina se controla por el operador a distancia segura de 10 a 200 metros evitando trabajos en áreas peligrosas.
- Control remoto telemático: el operador selecciona la dirección y velocidad estimada, mientras que el sistema a bordo controla aceleración, mecanismo de dirección y frenado, manteniendo el movimiento en la trayectoria / ruta.

La carga y descarga se realiza de forma remota en todos los modos.

El punto de control remoto está equipado con panel de control, receptores, módulos de Wi-Fi para transmitir audio y video, sillas de operador, monitores industriales y computadoras. Los equipos se controlan de forma remota tanto desde paneles portátiles como desde una estación móvil. Además, pueden trabajar de forma autónoma y en combinación.

Los signos vitales de equipos (velocidad y temperatura del motor, presión de aceite y otros parámetros) se transmiten digitalmente al punto de control remoto. Para garantizar el funcionamiento seguro del sistema, el punto remoto en el que se encuentran los operadores está automáticamente protegido contra colisiones con los "pilones" especiales alrededor del perímetro. Cada uno de ellos tiene un láser, un receptor del rayo reflejado y un reflector. Así se crea una barrera de láser, la cual en caso de la intersección con una persona o máquina detiene instantáneamente el funcionamiento de un equipo con control remoto. Además, el sistema de control tiene protección contra fallas internas. En caso de mal funcionamiento del equipo de transmisión de datos, el sistema también detiene la máquina.

Este método de control es bastante seguro, sin embargo, la seguridad depende en gran medida de la evaluación correcta de la situación por parte del operador, sus habilidades y experiencia. La complejidad del proceso, las condiciones adversas, combinadas con la naturaleza del trabajo que requiere mayor atención, provocan una fatiga rápida del operador y, como consecuencia, un aumento en la probabilidad de acciones erróneas. La desventaja del sistema de control remoto dentro de la línea de visión es que el operador humano no está exento del proceso de control, ya que requiere una presencia constante en el área de ejecución del proceso. Para relajar esta restricción se ha desarrollado un sistema autónomo.

### **2.1.2 Tecnologías autónomas para los camiones mineros**

Un ejemplo más distinguido del desarrollo autónomo basado en tecnología de control remoto es el camión autónomo *Komatsu 930E-AT* de 290 toneladas, desarrollado conjuntamente por Komatsu Ltd., Komatsu America Corp. y Modular Mining, está controlado centralmente con una red inalámbrica que integra:

- Sistema de monitoreo general GMS (*Global Monitoring System*): monitoreo de las lecturas de sensores y controladores especiales para realizar los ajustes necesarios a los parámetros del camión, evitando comandos incompatibles;

- Sistema de navegación NS (*Navigation System*): control del recorrido programado y mantención de la distancia como resultado de cualquier desviación del recorrido reduciendo la velocidad del camión hasta su detención por completo.
- Sistema de detección de obstáculos ODS (*Obstacle Detection System*): identificación de obstáculos en la carretera a una distancia de 100 m para evitar las colisiones reduciendo la velocidad del movimiento o su parada de emergencia. El sistema ODS incluye tres subsistemas anticolidión separados, la activación de los cuales depende de la distancia de alejamiento de obstáculos: *touch sensor* activa la protección a distancias cortas, el sensor supersónico detecta los obstáculos ubicados de hasta 15 m, para los obstáculos detectados a una distancia de 1,5 a 100 m se activa un radar láser.
- Sistema de monitoreo de vehículo (*Vehicle Monitoring System*): monitoreo de la condición técnica del camión, en caso de la detección de una disfunción mecánica, se disminuye automáticamente la velocidad hasta la detención completa. En caso de emergencia se puede manipular el vehículo desde el cargador frontal o a través de control remoto en caso de fallas en transmisiones de señal de radio.

Después de la detención el camión regresa al modo de control autónomo después de presionar el botón *Reset* ubicado dentro de la cabina. El sistema de navegación posee el principio de operación más complejo, que incluye antena, un giroscopio de fibra óptica, un sensor láser pulsante para corregir la dirección del movimiento y un sensor de rotación de la rueda.

Respecto de la eficiencia económica del uso de Komatsu 930E-AT, existe un caso de un polígono en Japón con una longitud de 510 m. Se concluyó que la mayor eficiencia económica se obtuvo con el uso simultáneo de tres camiones cumpliendo las siguientes condiciones: 10 m del ancho mínimo de la ruta, velocidad máxima del camión de 30 km /h durante el movimiento y 10 km/h retrocediendo. El caso demostró que el sistema de control es capaz de monitorear la velocidad con una tolerancia de hasta el 10%. El control de movimiento en modo autónomo se realizó desde el cargador en cuatro etapas: inicio del sistema, selección de un modelo de equipo autónomo, selección de la ruta automatizada e inicio de movimiento. Para expandir el área de cobertura a más de dos veces, se requerirá una estación de radio y se realizará un control similar utilizando un transmisor de radio. El control remoto de movimiento del camión autónomo en el punto de carga se lleva a cabo en modo semiautomático (equipo estándar) o utilizando un control remoto especial (opción). En el primer caso, el conductor de la máquina de carga cambia la ubicación del camión en el área de carga utilizando los botones del panel de control "hacia adelante", "hacia atrás", "de lado". En el segundo caso, el conductor dirige el camión a cualquier lugar de carga utilizando el control remoto cambiando la dirección del movimiento y ajustando la velocidad del camión.

El monitoreo y análisis del volumen de trabajo realizado por el camión, así como las condiciones de su operación se realiza a través del sistema *Payload Manager Meter* (PLM II y PLM III), que almacena los datos de hasta 2900 ciclos de trabajo. El sistema monitorea y registra parámetros tales como el peso de la carga transportada; kilometraje del vehículo (vacío y cargado); cargas máximas; tiempo de cada carga y descarga; tonelada de millaje para las ruedas delanteras y traseras; información sobre el ciclo de vida (recurso) del vehículo, velocidad máxima y media del vehículo (vacía y cargada). Además, se puede instalar el Sistema de Monitoreo de Salud del Vehículo (VHMS), que le permite rastrear y evaluar la condición técnica del camión y sus condiciones de operación en tiempo real, así como diagnosticar de inmediato el mal funcionamiento del motor principal y los componentes de la transmisión.



Figura 1. Camión autónomo Komatsu 930E-AT de 290 toneladas.

La característica principal del desarrollo robótico minero de Caterpillar es que su camión CAT 797B de 345 toneladas está equipado con un receptor GPS y un conjunto de telémetros láser y cámaras de video, cuya información se procesa por un computador a bordo que controla la máquina. Además, el camión utiliza un sistema integrado de detección de objetos CIODS basado en cámaras de radar y video.

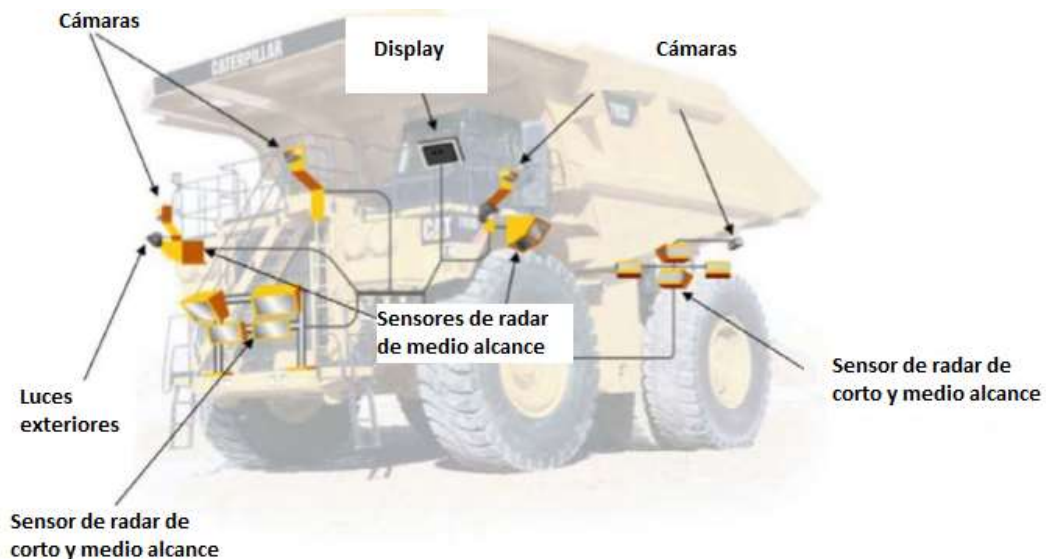
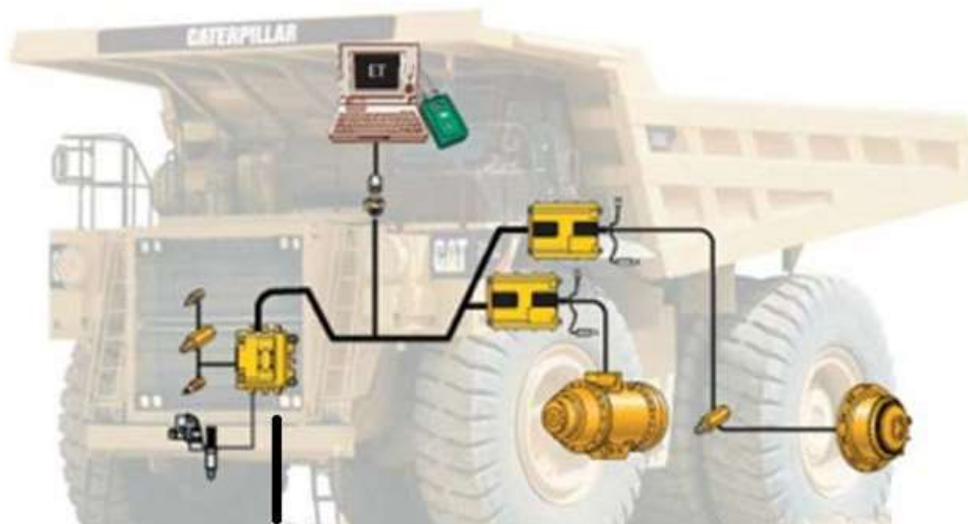


Figura 2. Sistema integrado de detección y anticolidión CIODS de Caterpillar.

Los camiones Caterpillar están equipados con varias modificaciones del sistema de monitoreo de los signos vitales - Vital Information Management System (VIMS™) que proporcionan información en tiempo real sobre la condición técnica y la carga útil de la máquina (más de 250 parámetros de diagnósticos diferentes), lo que garantiza el máximo rendimiento. El

sistema interactúa con el sistema de medición de la carga útil - Truck Payload Management System (TPMS), que detecta desviaciones y notifica al operador sobre sobrecargas. Los datos a través de canales inalámbricos del sistema de control automatizado CAT MineStar se transmiten al despachador para su análisis. Además, se instalan los sistemas de comunicación Product Link para simplificar el diagnóstico, reducir el tiempo de inactividad, integrar los horarios de mantenimiento y reducir costos. El sistema actualiza constantemente las lecturas del cronómetro, los datos sobre el estado de la máquina y su ubicación, y también permite planificar la ruta en el mapa.



Controlador a bordo que realiza diagnóstico del motor, suspensiones, arrastres y nivel de carga

Figura 3. Sistema de control VIMS <sup>TM</sup>.

La compañía japonesa *Hitachi Construction Machinery* en conjunto con la empresa tecnológica *Wenco International Mining Systems Ltd.* desarrolló un sistema autónomo de un ciclo tecnológico completo para el camión minero Hitachi EH5000AC-3 con accionamiento eléctrico de CA. El sistema consiste en un gabinete de control, antenas del sistema de navegación por satélite de alta precisión con la transmisión inalámbrica de datos, 4 *lidars* bidimensionales y 3 radares de un sistema de escaneo. Además del sistema de dirección estándar, el camión tiene instalado el accionamiento eléctrico.

La empresa Leica Geosystems Mining en sociedad con Autonomous Solutions, Inc. (ASI) desarrolló un complejo universal de equipo a bordo para el control autónomo no vinculado a ningún equipo específico ni tampoco fabricante. En el caso de este sistema, el monitoreo y control del movimiento de camiones autónomos y la detección de obstáculos se llevan a cabo a través del software *Mobius* <sup>TM</sup>. El conjunto incluye la unidad de control, actuadores de dirección, acelerador, frenos, transmisiones, equipos de sistema de navegación integrado a bordo de alta precisión, *lidar* 3D, radares, cámaras de video y equipos de transmisión de datos inalámbricos.



Figura 4. Equipo de Autonomous Solutions Inc. a bordo de un camión minero.

Recientemente, *Sandvik* también ha lanzado el cargador minero Sandvik LH514 de 11 metros y 38 toneladas. El sistema contiene un juego de láseres para escanear y mapear en forma reforzada por los algoritmos patentados de Sandvik, los sensores y giroscopios para navegar de manera efectiva incluso en las profundidades de una mina en área fuera del alcance del GPS. AutoMine se conecta directamente a Sandvik OptiMine, lo que permite una planificación eficiente de la producción y el envío automático de tareas a AutoMine para su ejecución. El sistema permite monitorear a través del OptiMine el progreso de la producción de las operaciones autónomas y manuales en tiempo real. OptiMine también permite realizar el seguimiento de ubicación de equipos y personas, visualización de minas 3D y análisis predictivo para transformar los datos en información procesable. La integración con My Sandvik Productivity permite a los usuarios del sistema monitorear el estado de su flota en tiempo real.



Figura 5. Sandvik LH514 con AutoMine

La empresa tecnológica de origen ruso Vist Group (actualmente pertenece a Zyfra Mining) también tiene su propio desarrollo de sistema autónomo para camiones mineros comercialmente disponibles con transmisión electromecánica de CA / CC. En el modo de control autónomo, el



sistema proporciona movimiento a lo largo de la ruta y ejecución de operaciones tecnológicas, tales como movimiento en una ruta determinada, carga y descarga.

El sistema también posee la posibilidad que el operador realice el control remoto del movimiento y las operaciones tecnológicas del camión desde su lugar de trabajo, a través de un canal de datos inalámbrico.

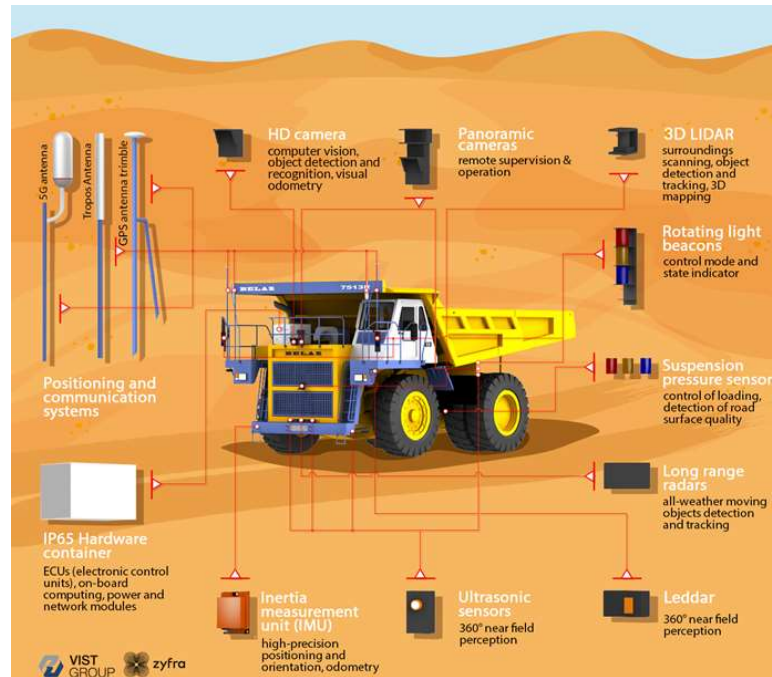


Figura 6. Camión BELAZ-7513R con sistema autónomo desarrollado por VIST Group (Zyfra Mining).

### 2.1.3 Análisis comparativo de las tecnologías autónomas destacados en mercado

Dado que para el estudio de caso fue elegido un sistema BELAZ, que es poco conocido en el mercado mundial, se ha formado un análisis comparativo de BELAZ con sistemas autónomos considerados como los líderes del mercado, tales como Caterpillar y Komatsu. Los resultados del análisis comparativo están reflejados en la Tabla siguiente:



Tabla 1. Análisis comparativo de los sistemas autónomos CAT, Komatsu, BelAZ.

<b>Criterio</b>	<b>Komatsu</b>	<b>Caterpillar</b>	<b>BelAZ</b>
Grado de integración	El control manual del camión, el sistema robótico y sistema de control de flota son módulos independientes y pueden combinarse con soluciones de otros proveedores.	El control manual del camión, el sistema robótico y sistema de control de flota solo pueden funcionar en conjunto.	El control manual del camión, el sistema robótico y sistema de control de flota son módulos independientes y pueden combinarse con soluciones de otros proveedores.
¿Considera la empresa como una línea de negocio la automatización de equipos antiguos o de otros fabricantes?	No	No, con excepciones	Sí
El movimiento del camión autónomo es a lo largo de una ruta predeterminada usando los datos de GPS de alta precisión.	Sí	Sí	Sí
Grabación de las rutas preestablecidas	Se realiza por un trabajador en la camioneta	Se realiza por un trabajador en la camioneta	Actualmente se realiza a través del control manual o remoto del camión, se puede usar un trabajador en la camioneta
Cobertura de radio completa	Sí	Sí	Sí
Transmisión del video en tiempo real desde el robot, la capacidad del cambio al control remoto en caso de situación peligrosa	No. Para resolver el problema, un especialista en camioneta debe acercarse	No. Para resolver el problema, un especialista en camioneta debe acercarse	Si es necesario, se puede habilitar el modo de control remoto sin que el especialista se acerque
Sistema anticolidión con lidares y radares, implementación de las rutas alternativas en caso del desvío	Sí	Sí	Sí
Funcionamiento del robot sin el servidor en la Sala de control	No	No, pero las funciones del servidor son mínimas	No
La velocidad del sistema autónomo comparando con el modo manual	En modo autónomo las velocidades son más altas (en tramos rectos velocidades de hasta 80 km / h)	En modo autónomo las velocidades son más altas (en tramos rectos velocidades de hasta 80 km / h)	En modo autónomo velocidad es equivalente al modo manual

Concepto Safety Bubble: el camión autónomo reconoce una zona circular segura alrededor de objetos no robóticos	El sistema reconoce los objetos en distancia de 10m del equipo no robótico. No hay rastreadores personales para personas.	El sistema reconoce los objetos en distancia de 10m del equipo no robótico. No hay rastreadores personales para personas.	No hay concepto de Safety Bubble, se busca la posibilidad de utilizar rastreadores personales para personas.
Instalación del sistema en los camiones pequeños (90 toneladas)	No	No	Sí
Funcionamiento en las condiciones climáticas difíciles.	Sí	Sí	Sí
Costo por camión, USD	900.000 – 1.000.000	1000.000	400.000 – 500.000

## 2.2 Tecnologías de automatización para las perforadoras

### 2.2.1 Tecnologías de control remoto o sistemas semiautónomas para las perforadoras

La empresa de minera Rio Tinto fue la primera en introducir la perforación autónoma (Bird et al.,2019). Un sistema de perforación autónomo permite al operador controlar de forma remota cuatro plataformas de perforación automatizadas simultáneamente. Rio Tinto también utiliza tecnología de visualización 3D, que proporciona modelos 3D de depósitos de mineral en tiempo real aún no explorado. Esta tecnología proporciona el funcionamiento de perforadoras y tronaduras más preciso, reduce el uso de explosivos y mejora la clasificación de residuos.

En 2015, siete plataformas de perforación autónomas perforaron más de 2.25 millones de metros y proporcionaron un aumento en la productividad de aproximadamente el 10%.

En 2018, se introdujeron cuatro plataformas de perforación equipadas con tecnología de perforación autónoma en la mina Yandicoogina en Pilbara, Australia.

La compañía minera BHP Group en la mina Yandi en Pilbara ha implementado tecnologías de perforación automatizada utilizando equipos de perforación PV-271, suministrados por Epiroc (Atlas Copco). Como resultado, fue aumentada la eficiencia de perforación en un 20%, se aumentó el número de metros perforados por turno en un 10%, y se extendió la vida útil del trépano en 22%. Además de un impacto económico evidente en los costos laborales, se redujo el tiempo de inactividades, tales como tiempos de colaciones y cambios de turno.

Caterpillar utiliza para la perforación autónoma una plataforma de perforación MD6250, que se puede integrar con CAT MineStar. Un operador desde una sala de control diseñado para simular una cabina de perforación puede controlar simultáneamente tres plataformas de perforación operadas de forma autónoma. En 2017, Caterpillar reportó resultados de un aumento del 40% de productividad a través de la perforación automatizada.

Sandvik ofrece la perforación autónoma y remotamente controlada por un operador, el cual puede gestionar una flota de perforación utilizando la navegación 3D. Esto le permite perforar más

pozos en menos tiempo, aumentando significativamente la seguridad y la productividad del proceso de perforación.

ASI también ofrece un sistema de perforación autónomo, el cual permite controlar y monitorear varias plataformas de perforación desde un centro de comando remoto. Los pozos se perforan en un orden previamente mapeado, sus coordenadas y profundidades están previamente programadas en el sistema. La perforación se dirige con precisión a las coordenadas correctas para la posición exacta del pozo.

Además de la perforación autónoma, la plataforma ASI Mobius proporciona navegación remota, semiautónoma o totalmente autónoma para los procesos de tronadura.

Joy Global (Komatsu) ha automatizado su línea de equipo de perforación P&H 77XR. El equipo tiene instalado un sistema semi-autónomo, que proporciona control remoto de una sola unidad, navegación GPS de alta precisión, navegación automática de pozo a pozo, sistema anticolidión y seguimiento de operaciones de perforación. El GPS de alta precisión proporciona una desviación de la posición del pozo de no más de 10 centímetros.

Flandes ha desarrollado el sistema de control FREEDOM, que es compatible con cualquier plataforma de perforación en el mercado. Este sistema de control le permite actualizar las plataformas de perforación utilizando herramientas de automatización y monitoreo del rendimiento de la maquinaria. Las plataformas de perforación actualizadas tienen las siguientes funciones: perforación autónoma, orientación autónoma, control remoto.

El departamento especializado de la compañía, RCT Custom, diseñó, fabricó e instaló con éxito el sistema Control Master Teleremote, especialmente diseñado para el control remoto de la plataforma de perforación Atlas Copco DML.

El módulo consta de cuatro joysticks que se pueden usar en cuatro modos diferentes para realizar 50 funciones necesarias para controlar la plataforma de perforación mediante control remoto.

## 2.2.2 Análisis comparativo de las tecnologías autónomas destacadas en mercado

Dado que para el estudio de caso fue elegido un sistema que es poco conocido en el mercado mundial, se formó un análisis comparativo del sistema analizado con los sistemas autónomos considerados como los líderes del mercado, tales como OEMs (Caterpillar, Epiroc, Sandvik), Flanders, RCT. Los resultados del análisis comparativo están reflejados en la Tabla siguiente.

Tabla 2. Análisis comparativo de los sistemas de perforación autónoma OEMs, Flanders, RCT.

Criterio	OEMs (Caterpillar, Epiroc, Sandvik)	Flanders	RCT	Caso de Estudio
Reequipamiento, modernización de maquinaria antigua	No	Sí	Sí	Sí

Perforación autónoma con extensión	Sí	Sí	No	Sí
Guiado autónomo	Sí	Sí	No	Sí
Control remoto	Sí	Sí	Sí	Sí
El grado de integración	Alto	Medio	Bajo	Alto
Uso de los lidares y radares para detección de los obstáculos, programación de las rutas para un desvío	Sí	Sí	No	Sí
Si el rendimiento de perforación autónoma es superior a la operación manual	Sí	Equivalente	No	Sí
Concepto Safety Bubble: una zona circular alrededor de objetos no robóticos	Sí	Muy baja	Baja	Sí
Flexibilidad de tecnología	Medio	Medio	Medio	Medio
Costo por perforadora, USD	700.000 -1.200.000	600.000 – 900.000	800.000 –1.800.000	300.000 - 550.000

## 2.3 Tecnologías de automatización para los ferrocarriles

### 2.3.1 Tecnologías de control remoto o sistemas semiautónomas para los ferrocarriles

La empresa minera Rio Tinto completó la puesta en marcha de un sistema ferroviario autónomo de larga distancia, que actualmente está en funcionamiento.

Cada uno de los trenes Rio Tinto totalmente automatizados consta de tres locomotoras que transportan 236 vagones (con capacidad de carga de 28 toneladas de mineral de hierro) a distancia de 280 kilómetros. El tiempo de ciclo promedio, incluyendo la carga y descarga, es de aproximadamente 40 horas. Cada locomotora está equipada con un módulo de controlador a bordo, que genera automáticamente informes sobre la ubicación exacta, la velocidad y la dirección del movimiento, y los envía a través de una conexión IP a una oficina central ubicada a una distancia de más de 1,500 kilómetros.

Las compañías mineras BHP Group y Fortescue Metals se encuentran actualmente en el proceso de implementación de un sistema automatizado ferroviario (Banks, 2020). El Grupo BHP comenzó el desarrollo con integración de un sistema de comunicación 4G y alarmas de seguimiento automatizadas para reducir las congestiones en la ruta (Cranenburgh, 2018).

La primera experiencia rusa en la automatización del transporte ferroviario se llevó a cabo en la estación Luga-Sortirovochnaya del Ferrocarril Oktyabrskaya. La compañía estatal rusa The Russian Railways y Siemens AG llegaron a un acuerdo para equipar la unidad de clasificación de la estación con el sistema de centralización por microprocesador MSR 32 fabricado por Siemens.

El sistema MSR 32 le permite lograr la automatización de todos los procesos de operación, incluyendo la coordinación de los trenes, el manejo de flechas y etc. La información más importante sobre el funcionamiento del sistema en tiempo real se transmite al centro de control. El sistema MSR 32 está diseñado de forma modular, lo que facilita su adaptación a cualquier requisito.

Además, NIIAS JSC (una subsidiaria de los ferrocarriles rusos) en la misma estación introdujo un Sistema de alarma de locomotora automática de maniobras (Kalinin, 2017). El sistema LITTLE está diseñado para reducir la influencia del factor humano en la seguridad del tráfico, para crear un complejo de hardware y software integrado en el sistema de control de procesos de una estación de ferrocarril, que incluye la automatización del control y la supervisión del movimiento de una locomotora de maniobra.

Ansaldo STS es una empresa internacional líder en tecnologías para el transporte ferroviario público, que proporciona sistemas y servicios para el control del tráfico, la planificación, el control de trenes y la señalización.

Ansaldo STS actúa como un contratista líder y proveedor llave en mano para grandes proyectos en todo el mundo, ofreciendo una gama completa de servicios para sistemas de alarmas y vehículos en las siguientes áreas:

- Ferrocarriles de alta velocidad;
- Transporte público;
- Planificación, control y gestión del movimiento;
- Componentes;
- Operación y mantenimiento.

Bombardier Transportation es líder mundial en el campo de la ingeniería ferroviaria, ofrece una amplia gama de soluciones para el transporte ferroviario: desde trenes totalmente equipados hasta subsistemas individuales, mantenimiento, herramientas de integración de sistemas y dispositivos ferroviarios de automatización y telemecánica.

Bombardier Transportation tiene más de 60 fábricas en 26 países de todo el mundo. La compañía tiene más de 36,000 empleados, y la flota que utiliza su equipo, supera los 100.000 vagones y locomotoras.

La compañía ofrece una gama completa de productos y servicios para el transporte ferroviario (Romanchikov, 2014):

- Material rodante (tren ligero, metro, trenes de cercanías, trenes regionales, trenes interurbanos, trenes de alta velocidad, locomotoras);
- Sistemas de transporte integrados (sistemas de monorriel, sistemas automatizados de transporte de pasajeros, sistemas de tren ligero);
- Servicio (mantenimiento de la disponibilidad operativa del material rodante, soporte de operación y mantenimiento, provisión de materiales, reequipamiento del material rodante, modernización de componentes del material rodante);
- Sistemas de control de tráfico (sistemas de control integrados, equipos aéreos y externos para garantizar el movimiento seguro de trenes, sistemas de bloqueo, equipos externos);
- Equipos de tracción y sistemas de control (convertidores de tracción, convertidores auxiliares, transmisiones de tracción, sistemas de control y comunicación), etc.

RCT ha diseñado, fabricado e instalado con éxito un sistema de control remoto que permite controlar la locomotora desde un lugar seguro, aumentando el nivel de seguridad y reduciendo el factor humano del operador. Este sistema existe en dos versiones:

- 1) Sistema de control dentro de la línea de visión (Line-of-Sight);
- 2) Sistema de control remoto telemático (Teleremote)

El Sistema de Gestión de Operaciones de Transporte Descentralizado Autónomo (ATOS) de East Japan Railway Company es un sistema de gestión de operaciones ferroviarias implementado en líneas ferroviarias de alta densidad en la región de Tokio.

El sistema ATOS fue instalado en la línea Keiyo entre Tokio Station y Soga Station en septiembre de 2016. La introducción de ATOS en las líneas de Keiyo y Musashino facilitó la entrada a las operaciones necesarias para mostrar los cambios en los horarios de los trenes, así como las operaciones automatizadas para notificar a las tripulaciones y las estaciones de tren y gestionar el trabajo de mantenimiento. La introducción del sistema ATOS también mejoró las condiciones para los pasajeros, es decir, permitió mostrar información más detallada en el tablero de salida del tren.

### 2.3.2 Análisis comparativo de las tecnologías autónomas destacadas en mercado

Para evaluar las ventajas competitivas de los sistemas automatizados para los ferrocarriles más destacados, se realizó un análisis comparativo de las tecnologías mencionadas.

Tabla 3. Análisis comparativo de los sistemas de ferrocarriles autónoma.

<b>Criterio</b>	<b>Ansaldo STS</b>	<b>Bombardier</b>	<b>RCT</b>	<b>Japan Railway</b>	<b>Caso de Estudio</b>
Movimiento autónomo	Sí	Sí	No	Sí	Sí
Control remoto	Sí	Sí	Sí	No	Sí
Experiencia práctica en robótica para minería	Sí	No	No	No	Sí
Sistema de control de flota ferroviario	No	Sí	No	Sí	Sí
La posibilidad de modernizar la flota ferroviaria existente en la empresa	No	No	Sí	No	Sí
Flexibilidad de la tecnología	Sí	Sí	No	Sí	Sí
Costo, USD	4.700.000	14.200.000	-	-	500.000

### 3. Información general del objeto de estudio

#### 3.1 Información general de la mina

El complejo minero considerado para el estudio de caso pertenece al productor ruso de materias primas de mineral de hierro. Los principales productos del complejo minero son:

- concentrado de mineral de hierro;
- mineral de sinterización de hierro;
- pellets de mineral de hierro.

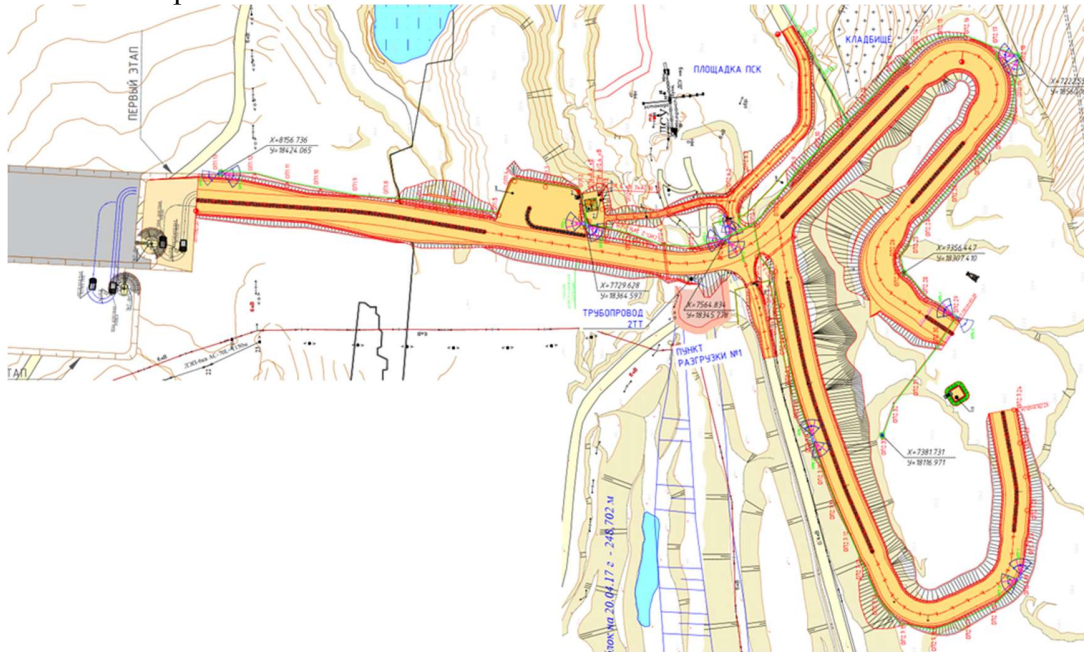


Figura 7. Zona autónoma para implementación de camiones autónomos

Las reservas de la mina cuentan con 6 mil millones de toneladas de mineral que es equivalente para 130 años de extracción. El mineral se extrae a través de minería a cielo abierto, la profundidad actual de la mina es 375 m. El mineral con alto contenido de hierro (50-56%) se envía directamente a la venta, las cuarcitas se trituran y se envían a la planta de procesamiento, donde el concentrado de hierro se obtiene mediante separación magnética. La transportación del mineral se realiza por camiones cisterna, ferrocarriles y correa transportadora.

En términos de producción de mineral, el complejo del Caso estudiado en este trabajo es uno de los principales productores de hierro en el mundo: 27,6 millones de toneladas de mineral de hierro en 2018 (17.4 millones de toneladas de concentrado de mineral de hierro en 2018; 1.5 millones de toneladas de mineral de sinterización en 2018; 6.7 millones de toneladas de pellets en 2018).

#### 3.1 Metodología de diagnóstico realizado para el estudio de caso

Para realizar este trabajo y obtener los inputs necesarios fueron hecho los siguientes pasos:

1. Análisis del funcionamiento actual de la mina a través de entrevistas de personal clave y usuarios del sistema:
  - Departamento de control de flota,

- Departamento de perforación y tronadura,
  - Departamento de ferrocarriles.
2. Análisis de informes ejecutivos elaborados a través del sistema de control de flota implementado dentro de la mina:
    - para la flota de camiones y perforadora fue analizado el período del 1 de diciembre de 2018 al 7 de diciembre de 2019;
    - para los ferrocarriles fue analizado el período 2014-2019;
  3. Como parte de la recopilación de datos sobre el funcionamiento de los talleres, se recopiló información sobre los cuellos de botella de los procesos tecnológicos, se realizó un análisis de las limitaciones técnicas del uso de equipos de operación manual, de control remoto y equipos robóticos;
  4. Se realizó una revisión de la flota actual de la mina, fueron definidos los problemas existentes, se evaluó el potencial para la introducción de tecnología robótica.
  5. Con el fin de evaluar el impacto económico de la implementación de los equipos robóticos para una minera a cielo abierto, fueron definidos los posibles impulsores de rendimiento económico, los cuales se aplicaron para el caso estudiado.

## **3.2 Los datos utilizados como inputs para realizar el análisis**

### **3.2.1 Flota de camiones mineros**

La flota minera cuenta con 40 camiones de los modelos BelAZ 75131 (130 toneladas), BelAZ 75139 (130 toneladas) y BelAZ 75307 (220 toneladas).

El número de los operadores en el área es de 163 personas y la duración del turno es de 8 horas.

Se indican los siguientes cuellos de botella del proceso de carga: densidad de roca (capacidad BelAZ 75131 - máximo 40 m<sup>3</sup>), área de carga desnivelada.

Disponibilidad de equipos antes de implementar modo autónomo es 81%, la utilización es 64%.

Los cuellos de botella detectados son:

- Tiempos de inactividad durante la carga y descarga, falta de un frente claro de trabajo, tiempo de inactividad asociado con el factor humano (colaciones, cambio de turnos, necesidades personales, etc.).
- Dependencia de la velocidad promedio del camión de los factores humanos, tales como:
  - Fatiga y habilidades de manejo;
  - Tiempo de turno y condiciones climáticas (dificultad de los turnos nocturnos y manejo en invierno);
  - Calidad y curvatura de la ruta.
- Las consecuencias:
  - Aumento del consumo de combustible;
  - Reducción en el kilometraje del uso de neumático;
  - Baja Disponibilidad de los equipos;
  - Tiempos de inactividades.

Estándares establecidos por la empresa para los tiempos de inactividad del camión, min / día:



- Cambio de turno – 18 min/día;
- Reabastecimiento de combustible – 18 min/día;
- Mantenimiento de cada turno – 42 min/día;
- Mantenimiento diario – 28 min/día;
- Inactividades para las necesidades personales – 60 min/día.

La distribución de los tiempos de inactividades está ilustrada en la Figura 7.

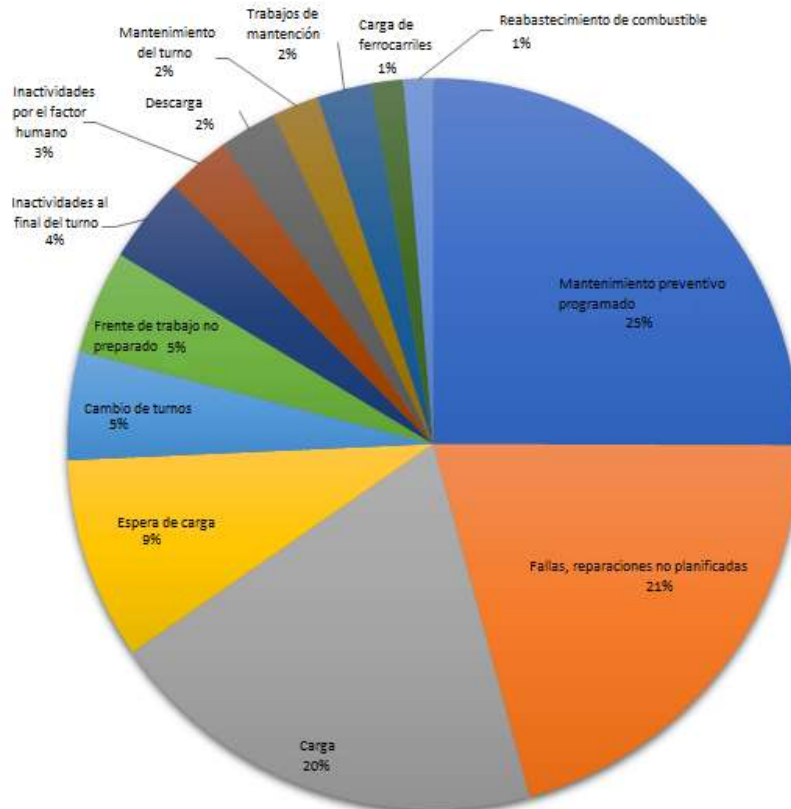


Figura 8. Distribución de las inactividades por el periodo referente 1.12.2018 – 7.12.2019.

Objetivos de la implementación del sistema robótico:

- Aumento de la productividad del 20-30%;
- Aumentar el nivel de seguridad.

### 3.2.2 Perforadoras

Cuenta con 10 Perforadoras SBH-250 y 1 SBH-270.

El número de operadores de perforadoras - 42 personas, el número de asistentes de operadores - 32 personas.

Duración del turno: 12 horas.

Los cuellos de botella detectados:

- Dado que las plataformas de perforación no están automatizadas, el número de pozos defectuosos se obtiene de manera manual (el rango de pozos defectuosos es del 3% al 12%, el pozo se considera defectuoso si su error de profundidad es más que 0,5 metros);
- Roca sobredimensionada es 0.05% de la masa total triturada;
- Disponibilidad de equipos es 87,3%.
- Tiempos de inactividad asociados con el factor humano (almuerzos, cambios de turno, necesidades personales, etc.);
- Impacto de las calificaciones de los operadores en la disponibilidad de equipos, consumo de cono y consumo de electricidad;
- Reducción de la productividad asociada con el funcionamiento inestable de las máquinas debido a las diferentes calificaciones de los operadores, condiciones climáticas, turnos nocturnos;
- Desviación del plan, que afecta el consumo de explosivos, las desviaciones en la composición granulométrica y, en consecuencia, la productividad de las excavadoras y los tiempos del ciclo de carga.

Objetivos de la implementación del sistema robótico:

- Aumento de la productividad del 10-15%;
- Aumentar el nivel de seguridad.

### 3.2.3 Ferrocarriles

La flota contiene 6 ferrocarriles del tipo NP-1, 7 ferrocarriles del tipo OPE-1-AM y 25 locomotoras del tipo OPE-1.

El número de operadores de ferrocarriles es 162, el número de conductores de electro locomotoras es 65. El número de asistentes es similar: 162 y 65, respectivamente.

Duración del turno: 12 horas.

Disponibilidad de equipos es 87,6%;

Los cuellos de botella detectados son:

- Tiempo de inactividad para reparaciones, cambios de turno, espera de carga / descarga.
- Presencia de situaciones de emergencia relacionadas con el factor humano y la condición de las vías del férreas;
- Baja disponibilidad de equipos debido al alto desgaste de la flota y errores operativos;
- Tiempo inestable del ciclo tecnológico asociado con la velocidad del movimiento no óptima de los ferrocarriles.
- De 8 estaciones, 7 están equipadas con señalización;

Las estadísticas sobre accidentes de tránsito y sus causas se muestran en las Figuras 9 y 10, respectivamente.

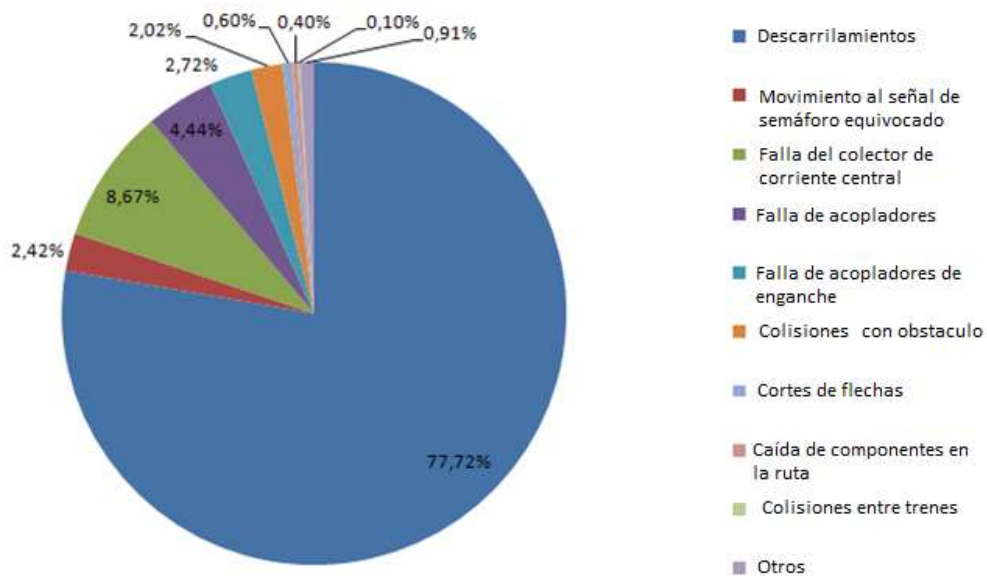


Figura 9. Estadísticas sobre la naturaleza de los accidentes de ferrocarriles para el período de 2014-2019

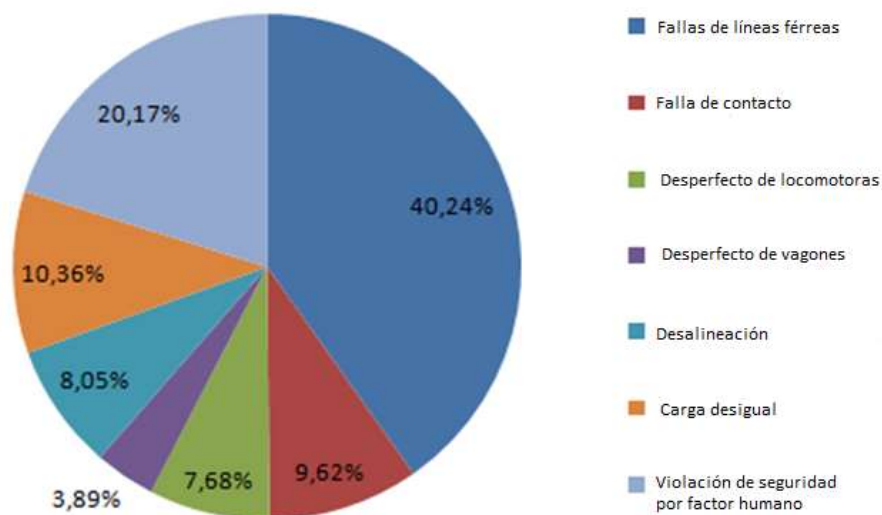


Figura 10. Estadística de las causas de los accidentes de tránsito del Ferrocarril para el período de 2014-2019.

Objetivos de la implementación del sistema robótico:

- Aumento de la productividad del 3-6%;
- Aumentar el nivel de seguridad.

### 3.3 Diagnóstico de la preparación técnica de la mina para el cambio operacional

Antes de realizar el cambio de la filosofía operacional hacia el modo autónomo se realizó un diagnóstico de la preparación técnica de la mina para el cambio operacional. Los resultados del diagnóstico están reflejados en la siguiente tabla.

Tabla 2. Evaluación de la preparación técnica de la mina para el cambio operacional hacia el modo autónomo.

Objeto de evaluación	Estado actual	Grado de preparación
<b>Flota de camiones</b>		
Disponibilidad de equipos	Para el complejo minero se utilizan los camiones BelAZ 75131, 75139, 75307 y CAT 777 para operaciones auxiliares. Los camiones BelAZ están equipados para la conversión al sistema autónomo sin medios mecánicos adicionales. Para la conversión es necesario reemplazar los cilindros de control del sistema de dirección hidráulica por dirección electrónica (requiere inspección). Como parte del reequipamiento de la flota, se considera una compra de un camión robótico BelAZ-7513R de 130 toneladas y también para el 2021 se considera una compra de un modelo de 220 toneladas (análogo BelAZ 75307).	Alto
Infraestructura	Para implementar el sistema robótico, es necesario reemplazar el sistema de comunicación actual (ABB Tropos) o realizar la modernización para el área autónoma piloto, que requiere tiempo e inversión adicional. En caso de cambio, se considera la red 5G, LTE o Fluidmesh (o equivalentes). Para introducir el sistema autónomo, se requiere elaborar las restricciones de acceso para equipos y personal para evitar colisiones, cubrir el área con equipos de video vigilancia fijos, equipar las intersecciones y cruces con barreras automáticas integradas en el sistema de control autónomo.	Mediano
Posibilidad de asignación de un área piloto.	Se considera asignar una mina a cielo abierto separada equipada con tres camiones de 220 toneladas.	Alto
Acceso del personal	El área autónoma requiere funcionamiento de niveladores y excavadoras, así como la presencia periódica de los geólogos y otros especialistas. Es necesario asegurar el algoritmo del cambio de turnos para el operador de la excavadora en el área de trabajo. Se requiere modernizar un sistema de anticolidión, sistema de control de flota o un análogo para la transmisión continua de la ubicación de los equipos.	Mediano
<b>Perforadoras</b>		

Disponibilidad de equipos	<p>Las plataformas de perforación eléctricas SBH-250 y SBH-270 están equipadas con diversos grados de automatización. La máquina SBH-270 está equipada con monitoreo de parámetros de perforación, los otros equipos equiparían con los sensores de los parámetros de perforación como parte de la robotización. Las plataformas de perforación utilizadas no tienen instalado un sistema de navegación de alta precisión, sin embargo, se instalará como parte de la robótica. Además, se va a integrar el sistema de planificación GEOMIX BVR.</p> <p>El objetivo principal de la preparación de los equipos para la integración del sistema autónomo es equipar los tambores para controlar automáticamente la longitud del cable eléctrico de alto voltaje. Como parte de la implementación de la robotización, también es necesario proporcionar un sistema de seguimiento de cables usando Lidar o análisis de video</p>	Mediano
Infraestructura	<p>El sistema autónomo de perforación se puede implementar inicialmente para reducir los costos y tiempo, utilizando la comunicación actual de ABB Tropos, la cual se utiliza para el sistema de control de flota, con la instalación de puntos de transferencia de datos adicionales en el área operativa de las plataformas de perforación. El área de trabajo de las máquinas está limitada por la operación de otros equipos, la presencia de una persona es mínima, lo que permite el uso de la robótica para introducir medidas de seguridad mínimas adicionales (señales y guardias de advertencia adicionales).</p>	Alto
Posibilidad de asignación de un área piloto.	<p>En el marco de la implementación del proyecto, es posible asignar un área de perforación separada y colocar una sala de control móvil en el área de trabajo</p>	Alto
Acceso del personal	<p>En el área de las plataformas de perforación no hay movimiento de equipos. El acceso es restringido.</p>	Alto
<b>Ferrocarriles</b>		
Disponibilidad de equipos	<p>Las locomotoras utilizadas incluyen equipos 6 NP-1, 7 OPE-1-AM, OPE-1. Parcialmente de la flota de perforadoras está muy desgastada con baja Disponibilidad, bajo equipamiento de sensores de diagnóstico y sistemas de control electrónico. Para el área piloto, es posible elegir locomotoras con el máximo grado de automatización y diagnóstico, sin embargo, el reequipamiento de toda la flota requiere tiempo y inversiones significativas.</p>	Mediano
Infraestructura	<p>Todas las estaciones y vías están equipadas con sistemas de control, que le permiten rastrear el movimiento y construir rutas seguras como para locomotoras robóticas tanto para locomotoras de</p>	Alto (el sistema de transmisión de datos es una parte integral de la implementación de la

	operación manual. Las vías ferroviarias no están cubiertas con la red, este requiere inversión y tiempo adicionales. Las intersecciones están equipadas con un sistema de control, que permite restringir el acceso para los equipos incluso sin robotización. Es necesario equipar las pistas (o intersecciones) con cámaras de vigilancia fijas y sistemas de análisis de video para reconocer los equipos y personas en las intersecciones. Para el personal de mantenimiento, se requieren dispositivos de alerta adicionales.	robotización y no puede considerarse como un factor que reduce el grado de disponibilidad)
Posibilidad de asignación de un área piloto.	Las locomotoras dependiendo del plan de trabajo, puede ser enviados a diferentes áreas de trabajo, separando las rutas a través del sistema de control existente. El sistema de las locomotoras robóticas puede ser integrada al sistema de control y señalación existente.	Alto
Acceso del personal	El movimiento de locomotoras y otros equipos auxiliares ya se están controlados por el sistema de control existente. Sin embargo, se pueden implementar las medidas de seguridad adicionales, tales como la instalación de un sistema de navegación GPS y sistema de transmisión de datos.	Mediano

### 3.4 Restricciones para la integración del sistema autónomo

Para la flota de camiones, la restricción evidente para implementar el sistema robótico, en caso si el mecanismo estándar del camión no incluye control a través del bus CAN, es la necesidad de instalar un controlador adicional que esté conectado en paralelo con los controladores estándares, tales como controlador de velocidad del motor, controlador del sistema de frenos (frenos dinámicos e hidráulicos), controladores del sistema de dirección y controladores del mecanismo de inclinación (Chaowasakoo et al, 2015).

Para la plataforma de perforación y los ferrocarriles, una restricción posible es la necesidad de instalar uno o más controladores que estén conectados en paralelo a los controles de la plataforma. Además, se requieren los sensores para monitorear los parámetros de perforación, cuya ubicación y tipo de instalación se determinan individualmente para cada unidad de equipo.

Para los mecanismos accionados manualmente (válvulas hidráulicas y electroválvulas mecánicas), es necesario reemplazar dichos dispositivos con dispositivos controlados electrónicamente.

## 4. Los componentes del sistema autónomo implementado

### 4.1 Componentes del sistema autónomo para la flota de camiones

El objetivo del proyecto es diseñar un sistema autónomo para camiones mineros disponibles comercialmente con transmisión electromecánica de CA / CC.

El complejo robótico debe proporcionar los siguientes modos de control para un camión minero:

- Modo autónomo:

En modo autónomo, el complejo robótico debe proporcionar movimiento a lo largo de la ruta y la ejecución de las operaciones tecnológicas, tales como:

- Movimiento en una ruta programada;
- Carga;
- Descarga.

- Modo de control remoto:

El operador debe tener la posibilidad tecnológica de llevar a cabo el control remoto del movimiento y las operaciones tecnológicas desde la sala de control a través de un canal de datos inalámbrico.

- Modo de control manual:

El movimiento y la ejecución de las operaciones tecnológicas deben poder ser realizados directamente por el operador desde la cabina de un camión minero.

Para realizar el proyecto de implementación del sistema autónomo se requiere la instalación de infraestructura adicional, que incluye:

- Equipo de transmisión de datos (Wi-Fi / LTE / 5G + LAN);
- Barreras y semáforos en los lugares de acceso / salida de la zona autónoma;
- Cámaras de video fijas;
- Servidor;
- Sala de control.

En la Tabla 3 están reflejados los componentes principales del sistema autónomo implementado:

Componente	Descripción
Modo de control	<ul style="list-style-type: none"><li>• Autónomo</li><li>• Remoto</li><li>• Manual</li></ul>
Protocolo de control	CAN
Sistema anticolidión	<ul style="list-style-type: none"><li>• Escáneres láser</li><li>• Radar</li><li>• Sensores ultrasónicos</li></ul>
Equipo de video vigilancia	Videocámaras digitales fijas
Equipo de navegación: - un tipo - precisión de posicionamiento en el modo de uso de corrección diferencial, (cm)	GLONASS/GPS  50 cm

Sistema de transmisión de datos:	
- estándar	802.11 b/g/n MESH
- rango de frecuencia, GHz	2400-2,483
Sistema de detención de emergencia:	
- frecuencia de canal de detención de emergencia, MHz	433,92±0,2%
Rango de temperatura de funcionamiento, ° C	-40° +50°
Humedad, %	95%
Fuente de alimentación	Red a bordo 24 V
Consumo de energía, W, máx.	1500 W

## 4.2 Componentes del sistema autónomo para las perforadoras

El objetivo de la integración de un sistema de control automatizado para la plataforma de perforación y la implementación de la sala de control remota es proporcionar la ejecución de las siguientes tareas tecnológicas de manera totalmente autónoma:

- Funcionamiento autónomo (sin participación humana) del ciclo de producción principal de la plataforma de perforación:
  - Movimiento, incluido el movimiento de los pozos;
  - Orientación autónoma para el pozo y nivelación;
  - Perforación autónoma, incluido el control de los parámetros de perforación;
- Control remoto de la plataforma de perforación.

Para realizar el proyecto de implementación del sistema autónomo se requiere la instalación de infraestructura adicional, que incluye:

- Equipo de transmisión de datos (Wi-Fi / LTE / 5G + LAN);
- Barreras y semáforos en los lugares de acceso / salida de la zona autónoma;
- Cámaras de video fijas;
- Servidor;
- Sala de control.

El sistema autónomo de perforación contiene los siguientes elementos:

- Perforadoras equipadas con el software de control autónomo;
- Sala de control donde se encuentra el operador;
- Equipamiento del sistema de transmisión de datos.

La estructura del sistema autónomo de la plataforma perforadora está ilustrada en la Figura 11.



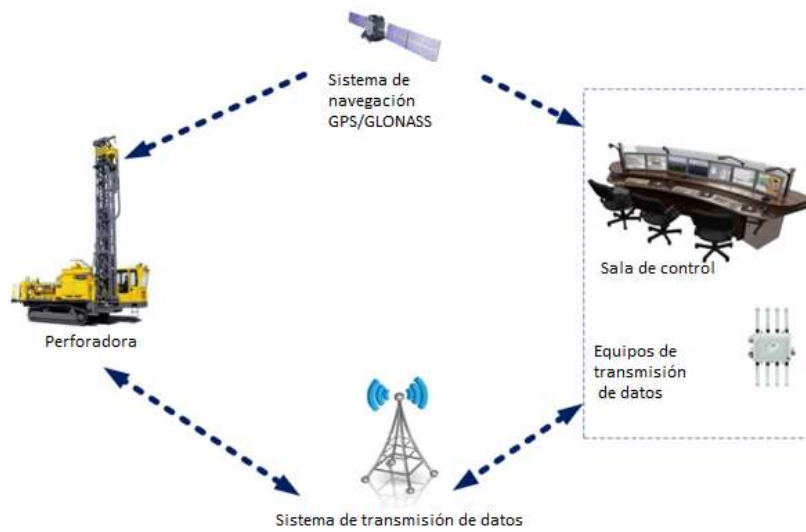


Figura 11. Estructura general de plataforma de perforación autónoma.

El equipo tiene que cumplir las normas para el uso industrial y funcionamiento estable en las condiciones climáticas severas, tales como polvo, lluvia, nieve, niebla, oscuridad y bajas temperaturas, aumentando la productividad, mientras que la misma cantidad de trabajo va a requerir menos máquinas y menores costos de operación.

Por lo tanto, el uso de una plataforma de perforación automatizada debería aumentar la productividad de las máquinas, mientras que la misma cantidad de trabajo utilizará menos máquinas, menores costos de operación.

En las Figuras 12-14 se demuestran los ejemplos de los componentes principales de los equipos externos del sistema.

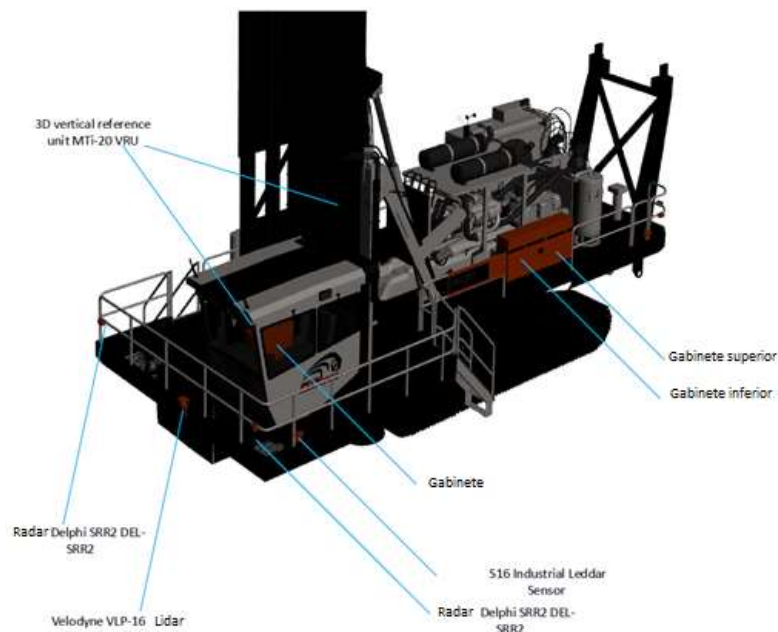


Figura 12. Equipos externos en la parte frontal y lateral de la plataforma de perforación.

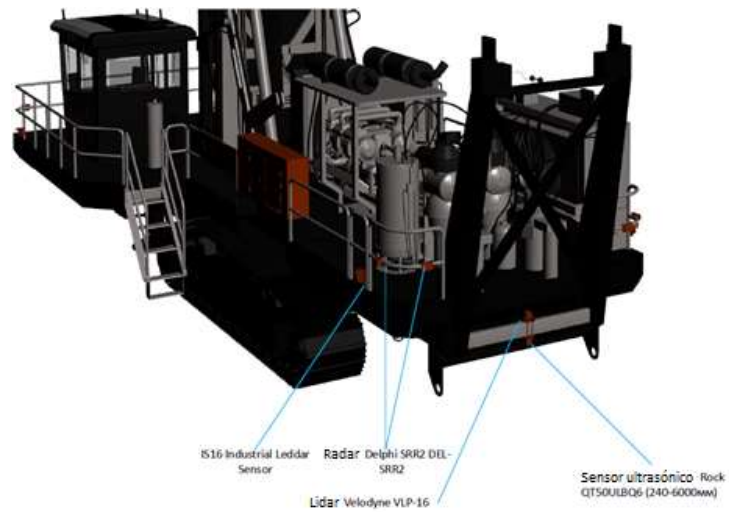


Figura 13. Equipos externos en la parte trasera de la plataforma de perforación.



Figura 14. Equipo externo en la parte superior del mástil de perforadora.

En la Tabla 4 están reflejados los componentes principales del sistema autónomo implementado:

Componente	Descripción
Modo de control	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Autónomo</li> <li>• Remoto</li> <li>• Manual</li> </ul>
Equipo de navegación: - Tipo	GLONASS/GPS

- Precisión de posicionamiento, cm	20
Frecuencia del canal de la detención de equipo de emergencia, MHz	433,92±0,2 %
Equipo de video vigilancia	Videocámaras digitales fijas
Equipo de escaneo ambiental	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lidares 3D</li> <li>• Lidares 2D</li> <li>• Radar</li> <li>• Sensores ultrasónicos</li> </ul>
Consumo de energía:	
- Equipos a bordo	Red a bordo de 24V
- Equipo básico y sala de control del operador.	Red 220V 50 Hz
Condiciones de funcionamiento para equipos externos:	
- Rango de temperatura de funcionamiento, ° C	-40° +60°
- Humedad, %	98%
Condiciones de funcionamiento de la cabina:	
- Rango de temperatura de funcionamiento, ° C	-40° +70°
- Humedad, %	90%

### 4.3 Componentes del sistema autónomo para los ferrocarriles

Un sistema automatizado de control de locomotoras debe tener las siguientes funciones:

- Movimiento autónomo de una locomotora en un área seleccionada;
- Control remoto;
- Entrada y parada automática en el área de carga;
- Entrada y parada automática en las áreas de descarga;
- Automatización del proceso de descarga;
- Detención de emergencia en caso de mal funcionamiento del equipo;
- Cruce de las intersecciones de manera autónoma, la activación automática de barreras;
- El control autónomo a bordo no debe impedir la posibilidad de control manual desde la cabina.

Para organizar la implementación de una locomotora autónoma, se requiere instalar la infraestructura adicional, tal como el sistema de control, las salas de control y los siguientes equipos:

- Marcas de luz activas en puntos clave;
- Barreras automáticas con semáforos;
- Equipo de transmisión de datos (Wi-Fi / LTE / 5G + LAN);
- Equipo de control de acceso;
- Vallado de la zona autónoma.

En las Figuras están demostrados los elementos del sistema de ferrocarril autónomo:



Figura 15. La infraestructura general del sistema de ferrocarriles automatizado.

Con las marcas de luz activas se entienden las lámparas LED dirigidas perpendicularmente al movimiento de la locomotora conectadas a la fuente de alimentación de 220 V.

Las videocámaras montadas en una locomotora deben fijar la posición de las marcas, determinando así la posición actual de la locomotora (Figura 16).

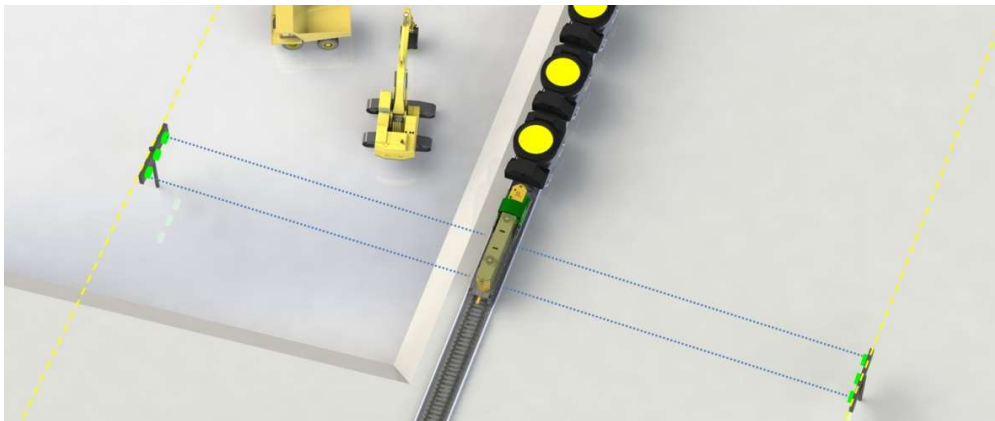


Figura 16. Posicionamiento por marcas visuales

Deben instalarse barreras automáticas (Figura 17) para bloquear el tráfico en la intersección. Para la activación, el equipo de transmisión de datos está conectado a las barreras.

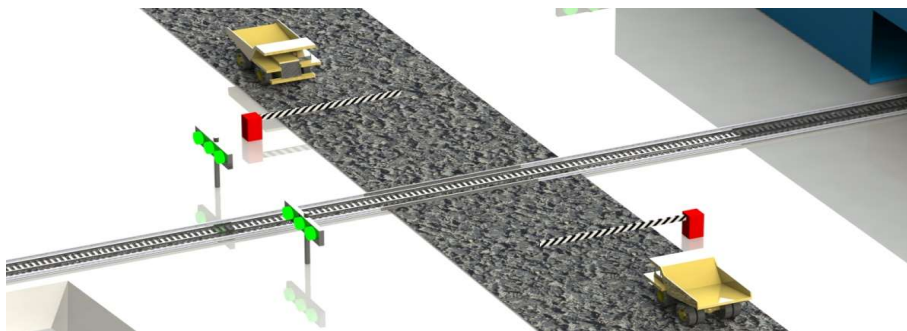


Figura 17. Barreras automáticas

El escenario propuesto para la operación de una locomotora autónoma en el área debe organizarse de la siguiente manera:

- 1) En la zona de carga, que es el punto de partida (Figura 18) del ciclo de trabajo, se realiza la carga de los vagones:



Figura 18. Locomotora en el punto de carga.

- 2) Después de completar el proceso de carga, la locomotora debe recibir un comando transmitido de forma inalámbrica. Se supone que el proceso de carga debe ser supervisado por el especialista responsable de la carga.
- 3) Al recibir un comando, la locomotora debe moverse a lo largo del sitio hasta el punto de descarga (Figura 19), mientras que las cámaras rastrear la presencia de marcas visuales y, una vez determinadas, el sistema registra la ubicación actual de la locomotora.

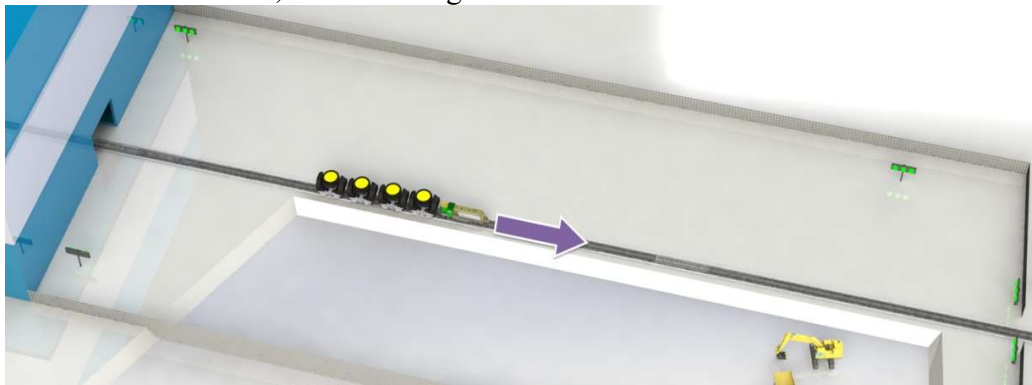


Figura 19. El movimiento de la locomotora hacia el punto de descarga

- 4) El sistema, al determinar las marcas visuales y la posición de la locomotora, maneja la locomotora a la posición del primer punto de descarga (Figura 20).

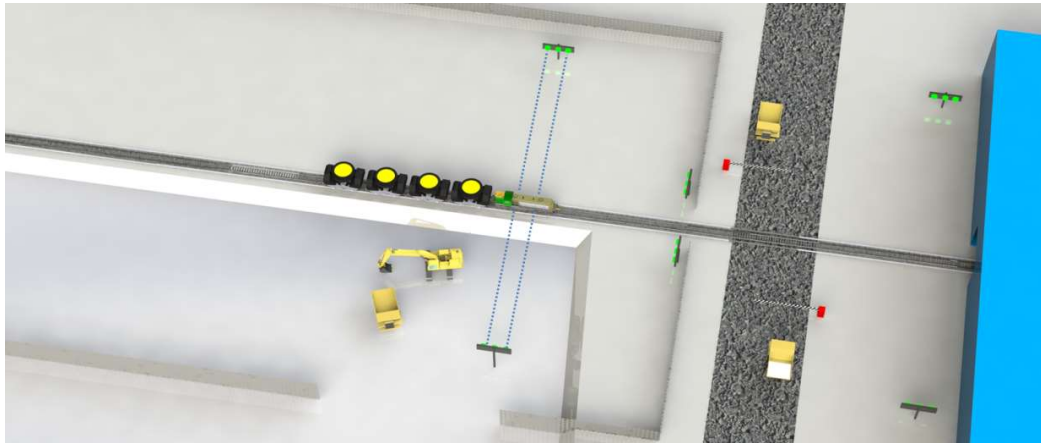


Figura 20. Locomotora en el primer punto de descarga.

- 5) Al detenerse en el primer punto de descarga, se debe encender una alarma que notifique el comienzo de la descarga.
- 6) Se realiza una descarga autónoma de los vagones (Figura 21).



Figura 21. Descarga de los vagones

- 7) Después de completar el proceso de descarga, la locomotora debe retroceder hasta el punto de carga (Figura 22).



Figura 22. Movimiento hacia el punto de carga

- 8) A continuación, se repitan los pasos 1-7.
- 9) En caso, si se requiere el movimiento al segundo punto de descarga, la locomotora recibe un comando a través de un canal inalámbrico de transmisión de datos.
- 10) Después de recibir el comando, la locomotora debe comenzar a moverse hacia el segundo punto de descarga.
- 11) Las etiquetas visuales se deben grabar en las cámaras de video frontales (Figura 23) similares a las instaladas en el punto de carga y el primer punto de descarga.



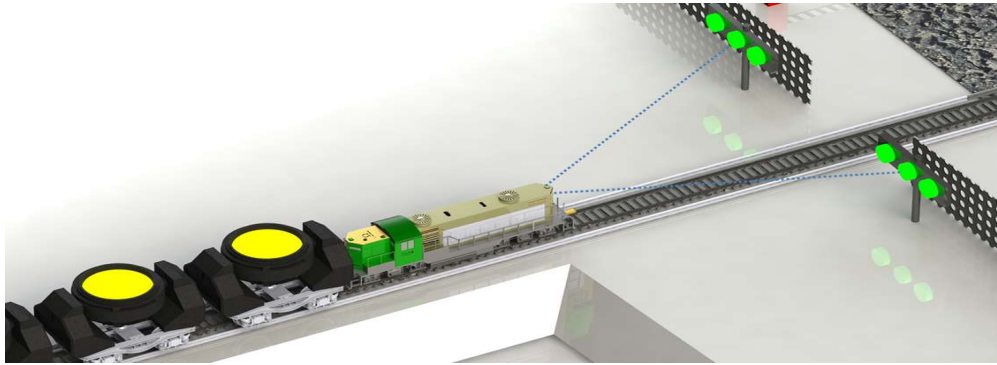


Figura 23. Definición de marcas visuales

- 12) Una vez determinada las marcas están determinadas, la locomotora a través de la red inalámbrica envía una señal a las barreras para activarlas y bloquear el tráfico en la intersección. Además, las marcas visuales cambian de color, lo que indicando a la locomotora que en este momento el paso no está permitido (Figura 24).

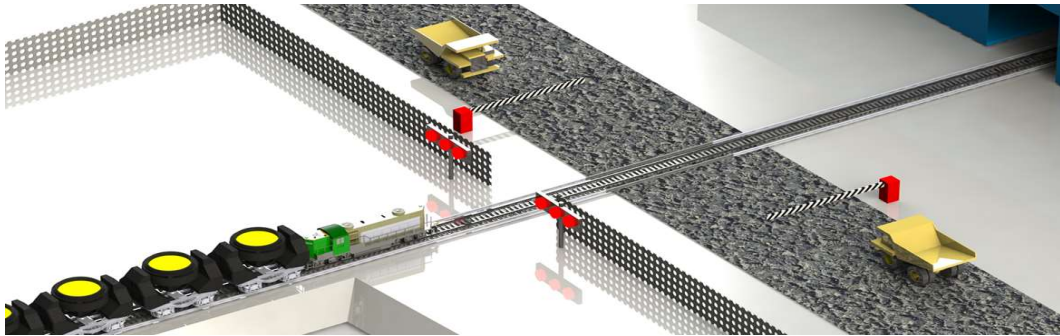


Figura 24. Señalización de marcas visuales sobre el paso prohibido

#### 4.4 Metodología del proceso de implementación

Se propone una metodología del proceso de implementación de tecnología robótica considerando el escenario de implementación el complejo autónomo que incluye camiones, plataforma de perforación y ferrocarriles:

##### 1. Diseño y la coordinación:

- Selección de la zona autónoma;
- Elaboración de la documentación de trabajo;
- Elaboración de las regulaciones y normas de seguridad para los trabajos en las áreas peligrosas;
- Elaboración del estudio de evaluación de seguridad industrial;
- Desarrollo de la documentación interna con un programa de prueba piloto;
- Asignación del personal clave responsables por realización de las pruebas piloto.

##### 2. Creación de infraestructura:

- Construcción de un centro de coordinación y control de vehículos autónomos;
- Instalación de la red inalámbrica para cubrir la zona autónoma;

- Creación de sistemas de video vigilancia y control de acceso.

3. Implementación de un sistema de control automatizado para tres plataformas de perforación (tres equipos de perforación podrán ser atendidos por un equipo del operador y asistente):

- Realización de las inspecciones de ingeniería, desarrollo del diseño del sistema;
- Adaptación de software para el modelo de plataforma de perforación seleccionado;
- Integración o implementación de sistemas de planificación y perforación;

4. Desarrollo de la zona autónoma con tres camiones autónomos:

- Montaje y puesta en marcha de tres camiones en condiciones aisladas de la zona de producción;
- Calibración de tecnología;
- Evaluación de rendimiento de tecnología;
- Capacitación para operadores y despachadores.

5. Zona piloto autónoma de la red ferroviaria (4 trenes)

- Desarrollo de ingeniería de la solución tecnológica;
- Instalación;
- Puesta en servicio;
- Operación de prueba.
- Evaluación de rendimiento de tecnología;
- Capacitación para el personal involucrado.

#### 4.5 Factores de riesgo principales relacionados con implementación de robots

Este proyecto, siendo un proyecto de análisis de inversión, se ha desarrollado basándose en suposiciones bien definidas con respecto a los costos, los volúmenes de producción y las ventas de productos manufacturados dentro del plazo del proyecto. Independientemente de la calidad y la validez de estos supuestos, el desarrollo futuro de eventos relacionados con la implementación del proyecto siempre es ambiguo. En ese sentido, la práctica del diseño de inversiones considera, entre otros, aspectos de incertidumbre y riesgo.

En la Tabla 5 se reflejan los riesgos principales relacionados con implementación de un proyecto tecnológico del tamaño analizado en este trabajo.

#	Riesgo	Grado (A-Alto, M-Mediano, B- Bajo)	Acciones recomendadas para la gestión de riesgo
1	No lograr el rendimiento dinámico de la tecnología robótica y otros KPI comparables a la tecnología tradicional.	B	Riesgo tecnológico: Gestionable.  Realizar las pruebas piloto y desarrollo de tecnología en condiciones mineras reales de empresa.
2	Dificultad para coordinar el posible cambio operacional con OEMs.	B	Riesgo tecnológico: Gestionable.  Involucrar a los fabricantes de equipos mineros al proyecto.



3	Caída de precios del mineral extraído, fuerza mayor.	A	Riesgo macroeconómico: No gestionable.
4	Retrasos en financiamiento de proyecto.	M	Riesgo financiero: Gestionable.  Desarrollar los mecanismos de financiamiento para lograr el efecto económico del uso de tecnologías robóticas.
5	Imposibilidad de lograr rentabilidad y retorno de la inversión.	B	Riesgo de inversión: Gestionable.  Se propone cubrir el riesgo con separar las etapas de implementación, implementando las tecnologías más rentables en el principio del proyecto.
6	Retraso en implementación del sistema por parte de los proveedores de equipos, retrasos en construcción e instalación, etc.	M	Riesgo de gestión: Gestionable.  Gestionar en el principio del proyecto la coordinación clara con carta Gantt y entregables definidas. Trabajar con los proveedores de componentes de confianza.

## 5. Los indicadores impulsores esperados de la eficiencia económica de la implementación del sistema autónomo

### Flota de camiones mineros

Las nuevas tecnologías han sido ampliamente reconocidas como la clave para el logro de la competitividad en la industria minera, lo que permite reducir los costos y el impacto ambiental al tiempo que aumenta la seguridad, la flexibilidad y la productividad (Dessureault et al, 2000).

La hipótesis inicial de este trabajo es que, con el reequipamiento técnico de la flota de camiones para la mina elegida en este estudio, es que existen varias fuentes potenciales de efecto técnico debido a las cuales será posible aumentar la productividad y reducir los costos. Para evaluar el cambio porcentual, fue considerada la experiencia extranjera de introducir camiones robóticos a la operación y los cálculos realizados con los datos recibidos del sistema de control de flota.

- Disponibilidad mecánica

Para caracterizar explícitamente la distribución de las horas de funcionamiento de camión se ha elaborado la siguiente figura de clasificación de horas:

Figura 25. Modelo de caracterización de las horas de calendario

Horas de Calendario			
Horas Hábiles			Horas Inhábiles
Horas Disponibles		Horas Mantenición	
Horas Operativas		Horas Reserva	
Horas Efectivas	Horas Perdidas		

Horas de calendario (HC): Son las horas correspondientes al tiempo calendario natural como días, meses, años, etc., se dividen en horas hábiles e inhábiles.

Horas hábiles (HH): Son las horas en que la faena está en actividad y/o en tareas de mantención de sus elementos de producción y/o infraestructura, en estas horas cada equipo o unidad está en operación, reserva o mantención.

Horas operativas (HO): Son las horas en que el equipo o unidad se encuentra entregado a su(s) operador(es), en condiciones electromecánicas de cumplir su función de diseño y con una tarea asignada.

Horas de mantención (HM): Horas en que el equipo no está operando. Esta definición considera las mantenciones programadas y las no programadas.

Horas en reserva (HR): Son las horas en que el equipo o unidad, estando en condiciones electromecánicas de cumplir su función de diseño, no la realiza por no contar con un operador y/o frente donde operar (cambios de turno, tiempos de colación, etc).

Horas efectivas (HE): Son las horas en que el equipo o unidad está funcionando y cumpliendo su objetivo de diseño.

Horas perdidas (HP): Son las horas en la unidad o equipo, estando en condiciones electromecánicas de cumplir con su objetivo de diseño, a cargo de su(s) operador(es) y con una tarea asignada, no puede realizarla por motivos ajenos a su funcionamiento intrínseco, como por

tronadura, traslados, a la espera de equipos complementario, carga de combustibles, tiempo en colas y en general por razones asociadas a la coordinación de las operaciones.

Tabla 6. El cálculo de las horas efectivas antes y después de implementación del sistema robótico

Nombre	Modo manual	Modo autónomo	Diferencia	Diferencia, %	
Cantidad días hábiles	347	347			
Horas de calendario de todos turnos al día (h)	24,0	24,0			
Horas hábiles	8328	8328			
Horas mantención (h)	1591	1492	-159	-10%	
Horas disponibles (h)	6737	6896	159	+2%	
Horas disponibles	Horas operativas (h)	4298	4955	657	+15%
	Horas reservas	2439	1941	-498	-20%
Horas operativas	Horas efectivas	3339	3996	659	+20%
	Horas perdidas	959	959	0	0%

Disponibilidad mecánica: el porcentaje del tiempo durante el cual un equipo está en condiciones electromecánicas óptimas de realizar sus funciones específicas del total del tiempo de operación, [%]. Para los equipos mineros, la disponibilidad mecánica (DM), según Gutierrez Quispe (2013), se define como (tiempo programado - tiempo de mantención) dividido por el tiempo programado. El tiempo de mantención incluye tanto la mantención programada y las fallas de los equipos.

$$D[\%] = \frac{HO + HR}{HH} = \frac{HH - HM}{HH}$$

donde:

- Horas operativas (HO) - horas en que el equipo o unidad se encuentra entregado a su(s) operador(es), en condiciones electromecánicas de cumplir su función de diseño y con una tarea asignada.
- Horas en reserva (HR) - horas en que el equipo o unidad, estando en condiciones electromecánicas de cumplir su función de diseño, no la realiza por no contar con un operador y/o frente donde operar (cambios de turno, tiempos de colación, etc.)
- Horas hábiles (HH) - horas en que la faena está en actividad y/o en tareas de mantención de sus elementos de producción y/o infraestructura, en estas horas cada equipo o unidad está en operación, reserva o mantención.
- Horas de mantención (HM) - horas en que el equipo no está operando. Esta definición considera las mantenciones programadas y las no programadas.

La disponibilidad mecánica del camión antes de implementar el modo autónomo:

$$Dm \text{ manual} = (8328 - 1591) \div 8328 * 100 = 81\%$$

La disponibilidad esperada después de implementar el modo autónomo es:

$$Dm \text{ autónomo} = (8328 - 1432) \div 8328 * 100 = 83\%$$

Es decir, con implementar camiones autónomos se espera aumentar la disponibilidad de 81% a 83% (2% en variación porcentual)

- Utilización

Es un indicador que mide el porcentaje de utilización de máquina con respecto al tiempo programado o de disponibilidad para el trabajo de la máquina. Proporciona información sobre el buen uso del tiempo de los activos de la empresa. Un alto valor de este indicador muestra que la máquina está siendo utilizada todo el tiempo disponible en labores de producción. Un valor bajo de la utilización de máquina indica que existe un mal planeamiento del uso de los equipos en obra.

$$Utilización = \frac{HO}{HO + HR} * 100,$$

El parámetro de utilización también le llaman como el uso de la disponibilidad. Sin embargo, para la evaluación de la situación mecánica es importante disponer con ambos datos, dado que, por ejemplo, alta utilización no obligatoriamente significa una alta productividad, ni tampoco una alta disponibilidad mecánica puede garantizar por sí sola una alta productividad.

$$U_{manual} = \frac{4298}{4298 + 2439} * 100 = 64\%,$$

$$U_{autónomo} = \frac{4955}{4955 + 1941} = 72\%,$$

Se espera con implementar camiones autónomos aumentar coeficiente de utilidad de equipos de 64% a 72% (13 % en variación porcentual).

- Productividad

La productividad y su medición es un tema importante para cada empresa minera, sobre todo considerando el alza actual de la demanda por metales, alza en los costos de producción por el aumento de los precios de la electricidad, mano de obra y la escasez de agua.

El concepto de productividad corresponde a la relación que existe entre la cantidad de insumos y recursos utilizados para la obtención de un producto determinado. La función de producción estimada se calcula a través de una regresión lineal en base a datos históricos de los factores productivos considerados como explicativos (capital físico, dotación de personal, consumo energía, ley de cobre en mineral y la razón estéril mineral) sobre la especificación de un modelo de función de producción transcendental logarítmico.

La productividad diaria de los equipos se calcula de siguiente manera:

$$Productividad \left[ \frac{t}{a} \right] = HE \left[ \frac{h}{a} \right] * PE \left[ \frac{t}{h} \right],$$

donde:

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

La ecuación de la productividad muestra que dicho parámetro se puede mejorar a través del incremento de la cantidad de horas efectivas (HE) mediante las horas de mantención (HM), las horas en reserva (HR) y las horas perdidas (HP), mediante de mejora de la productividad efectiva (PE) que depende de las distancias a recorrer, velocidad de los equipos, tiempos de carga y descarga u otros factores o aumentando el número de ciclos por día y incrementado la carga útil.

Tabla 7. Cálculo de la productividad diaria

Nombre	Modo manual	Modo autónomo	Diferencia	Diferencia, %
Horas efectivas, anual	3339	3996	659	+20%
Días hábiles al año	347	347	-	-
Horas efectivas diarias	9,6	11,5	1,9	20%
Ciclos por mes por todos camiones, ciclos	34654	38462,3	3808	11%
Tiempo de ciclo, h	0,86	0,77	0,09	10%
Numero de ciclos por hora por camión	1,16	1,29	0,13	11%
Productividad efectiva por hora efectiva  (se calcula como Nº ciclos*130t*sobrecarga (0,89))	134,2	149,2	15	11%
Productividad diaria por camión	1288,3	1715,8	427,5	33%

Los resultados evaluados están demostrando que la implementación de los camiones robóticos estimula reducir principalmente las horas de inactividades relacionadas con los cambios de turnos y colaciones. Además, provoca menor efecto a las horas de mantención y tiempos de espera en las colas, debido a la gestión centralizada de la flota. Como resultado, se espera aumentar la productividad en 33%.

- Velocidad promedio del turno

Debido a la creación de las condiciones óptimas de conducción, se espera lograr el incremento de la velocidad promedio al menos en un 10% (el cambio porcentual se estimó sobre la base de la experiencia de implementación extranjera, así como la experiencia de la empresa-integrador de la tecnología:

Tabla 8. Estimación de la velocidad promedia después de automatización

	Modo manual	Modo autónomo	Diferencia	Diferencia, %
Cantidad de camiones	40	40	-	-
Distancia de ciclo, km	5,35	5,35	-	-

Velocidad promedio del turno, km/h	6,22	6,94	0,72	11%
Tiempo de ciclo, h	0,86	0,77	0,09	10%

- Reducción del fondo de remuneración de los operadores de los camiones

El salario mensual del operador de la mina evaluada es equivalente a los 1073 USD. Después del reequipamiento técnico de la flota, un operador se convierte en el operador de cuatro camiones. Por lo tanto, será posible reducir el número de conductores de 163 a 41, lo que significa una reducción en el fondo de remuneración en un 75%:

Tabla 9. Estimación del fondo de remuneración de los operadores al implementar los camiones autónomos

	Modo manual	Modo autónomo	Diferencia	Diferencia, %
Cantidad de operadores	163	41	122	75%
Fondo remuneración mensual operadores, USD	174.876,51	43.719,13	131.157,38	75%

- Consumo de combustible

Según sugiere Jamasmie (2018), debido a las condiciones óptimas de conducción, se espera reducir el consumo de combustible por lo menos en un 5% (el cambio porcentual se estimó en base a la experiencia de implementación extranjera, así como a la experiencia de la empresa-integrador de la tecnología).

Tabla 10. Estimación del consumo de diesel al implementar los camiones autónomos

	Modo manual	Modo autónomo	Diferencia	Diferencia, %
Cantidad camiones, unidad	40	40	-	-
Consumo específico de diesel (g/tkm)	97,69	92,81	4,88	5%
Costo de combustible, USD/l	0,67	0,67	-	-
Kilometraje total, km	14.123.200	14.123.200	-	-
Costo unitario de combustible, USD/tkm	0,055	0,052	0,003	5%
Costo de combustible total, USD	776.492,52	737.703,72	38.788,86	5%

$$\text{Costo unitario combustible} = \frac{\text{Costo combustible}}{1000} * 0,84 * \text{Consumo específico},$$

$$\text{Costo de combustible total} = \text{Costo unitario combustible} * \text{Kilometraje total}.$$

- Vida de los neumáticos

Según los datos esperados, la implementación de los equipos robóticos afecta de manera positiva en el desgaste de los neumáticos. Generalmente, esto se explica porque el camión autónomo posee una distancia respecto al pretil de referencia con menos variaciones en la velocidad de los equipos, lo que hace que los neumáticos reduzcan significativamente los impactos en las bandas laterales, así mismo consiguiendo una vida útil más larga. La diferencia porcentual se estimó con base a la

experiencia de implementación extranjera, así como a la experiencia de la empresa-integrador de tecnología (Jamasmie, 2018):

Tabla 11. Estimación de la vida de neumáticos al implementar los camiones autónomos

	Modo manual	Modo autónomo	Diferencia	Diferencia, %
Cantidad camiones	40	40	-	-
Kilometraje por camión (km/año)	73240	73240	-	-
Costo kit neumáticos, USD	163.800	163.800	-	-
Vida útil de neumáticos, km	100.000	115.000	15.000	15%
Costo total por neumáticos por año, USD	4.798.714	4.172.795	625.919	13%

- Ingresos del mineral y concentrado transportado

Tabla 12. Cálculo del ingreso del mineral y concentrado transportados

Aumento de productividad, %	33%
Mineral transportado en modo manual, t	48.113.613,60
Costo transporte, (% del costo total)	11%
Volumen esperado adicional de la masa transportada por 40 camiones, t	1.746.524,17
Coefficiente de salida del producto final	0,47
Precio mercado por tonelada de concentrado (producto final), USD/t.	42
Ingreso extra anual esperado por aumento de producción, USD	34.930.483
Ingreso extra mensual esperado por aumento de producción, USD	2.910.873,60

## 5.1 Perforadoras

Uno de los objetivos principales para implementar las plataformas de perforación robótica es optimizar el proceso de perforación y reducir los costos debido a la gestión centralizada desde la sala de control. En este capítulo está descrito el impacto esperado de automatización.

- Reducción de inactividades

Tabla 13. El cálculo de las horas efectivas antes y después de implementación del sistema robótico

Nombre	Modo manual	Modo autónomo	Diferencia	Diferencia, %
Cantidad días hábiles	347	347		
Horas de calendario de todos turnos al día (h)	24,0	24,0		
Horas hábiles	8328	8328		
Horas mantención (h)	1058	846	212	-20%

Horas disponibles (h)		7270	7482	212	+3%
Horas disponibles	Horas operativas (h)	6287	7048	761	+12%
	Horas reservas	983	434	549	-15%
Horas operativas	Horas efectivas	4942	5703	761	+15%
	Horas perdidas	1345	1345	0	0%

- Disponibilidad

$$D[\%] = \frac{HO + HR}{HH} = \frac{HH - HM}{HH}$$

donde:

- Horas operativas (HO) - horas en que el equipo o unidad se encuentra entregado a su(s) operador(es), en condiciones electromecánicas de cumplir su función de diseño y con una tarea asignada.
- Horas en reserva (HR) - horas en que el equipo o unidad, estando en condiciones electromecánicas de cumplir su función de diseño, no la realiza por no contar con un operador y/o frente donde operar (cambios de turno, tiempos de colación, etc.)
- Horas hábiles (HH) - horas en que la faena está en actividad y/o en tareas de mantención de sus elementos de producción y/o infraestructura, en estas horas cada equipo o unidad está en operación, reserva o mantención.
- Horas de mantención (HM) - horas en que el equipo no está operando. Esta definición considera las mantenciones programadas y las no programadas.

La disponibilidad mecánica del camión antes de implementar el modo autónomo:

$$Dm \text{ manual} = (8328 - 1058) \div 8328 * 100 = 87,3\%$$

La disponibilidad esperada después de implementar el modo autónomo es:

$$Dm \text{ autónomo} = (8328 - 846) \div 8328 * 100 = 89,8\%$$

Con eliminar las fallas relacionadas con el factor humano, se espera un aumento de Disponibilidad de equipos en un 3% (basado en la experiencia extranjera (Applebee, 2019), así como la experiencia de la empresa-integrador de tecnología), de 87,3% a 89,8% (3% en variación porcentual).

- Productividad

La productividad diaria de los equipos se calcula de siguiente manera:

$$Productividad \left[ \frac{t}{d} \right] = HE \left[ \frac{h}{d} \right] * PE \left[ \frac{t}{h} \right],$$

donde:

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

Tabla 14. Definición de la productividad de perforadoras



Nombre	Modo manual	Modo autónomo	Diferencia	Diferencia, %
Horas efectivas, anual	4942	5703	761	+15%
Días hábiles al año	347	347	-	-
Horas efectivas diarias	14,2	16,4	2,2	15%
Norma de perforación efectiva por hora, m	60,5	-	-	-
Productividad diaria, m	859,1	992,2	133,1	15%

Debido al funcionamiento del proceso de perforación más estable mediante la automatización, se espera un aumento de productividad en 15% (Bird et al, 2019), (Sysoev, 2019).

- Costo de 1m perforado

Con implementar las plataformas de perforación autónomas de está esperando reducir el costo de 1 m perforado a 20% (basándose en las practicas mundiales e información de empresa integrador de tecnología), dado que se espera eliminar los casos de sobreperforaciones, los cuales están ocurriendo en actualidad, y por lo tanto reducir el consumo de explosivos.

Tabla 15. Reducción de costos por aumento de productividad

	Modo manual	Modo autónomo	Diferencia	Diferencia, %
Costo de 1m de perforado, USD	9,86	7,88	1,98	20%
Perforado por 1 año	504.000	579.600	75.600	15%
Costo total anual	4.969.440	4.567.248	402.192	8%
Costo mensual	414.120	380.604	33.516	8%

- Fondo de remuneración de los operadores de perforadoras

El salario mensual de operador es equivalente a 1.073 USD, y del asistente del operador es equivalente a 490 USD. Después del reequipamiento técnico de la flota de la plataforma de perforación, será posible reducir el número de operadores de 42 a 14 y el número de asistentes de operadores de 32 a 11, lo que significa reducir el fondo salarial anual en un 66%:

Tabla 16. Fondo de remuneración de operadores

	Modo manual	Modo autónomo	Diferencia	Diferencia, %
Cantidad de operadores, personas	42	14	28	66%
Cantidad asistentes de operadores, personas	32	11	21	66%
Fondo de remuneración mensual	60.720,20	20,410,07	40.310,13	66%

- Consumo de electricidad

Con implementar las plataformas de perforación autónoma se espera aumentar el costo por consumo de electricidad (basándose en las practicas mundiales e información del integrador de tecnología):

Tabla 17: Evaluación de los costos de consumo de combustible antes y después de implementación autónoma

	Modo manual	Modo autónomo	Diferencia	Diferencia, %
Costo de electricidad, USD / kWh	0,04	0,04	-	-
Consumo unitario de electricidad por 1 m, kWh	23,34	23,34	-	-
Perforación anual	504.000	579.600	75.600	15%
Costo electricidad anual, USD	470.534,40	541.114,60	<b>-70.580,20</b>	15%
Costo electricidad mensual, USD	39.211,20	45.092,90	<b>-5.881,70</b>	15%

- Ingresos del mineral y concentrado transportado

Tabla 18. Cálculo del ingreso del mineral y concentrado transportados

Aumento de productividad, %	10%
Mineral transportado en modo manual, t	48.113.613,60
Costo transporte, (% del costo total)	11%
Volumen esperado adicional de la masa transportada por 40 camiones, t	952.244,77
Coefficiente de salida del producto final	0,47
Precio mercado por tonelada de concentrado (producto final), USD/t.	42
Ingreso extra anual esperado por aumento de producción, USD	36.379.335
Ingreso extra mensual esperado por aumento de producción, USD	174.578,21

## 5.2 Ferrocarriles

La idea principal de automatización de los ferrocarriles es aumentar la productividad y reducir los costos. La evaluación del impacto de la implementación del sistema autónomo está basada en la experiencia extranjera en la introducción de locomotoras eléctrico-robótica.

- Tiempos de inactividad

En este trabajo no están considerados todos los datos por falta de tiempos de mantención y otros datos. Sin embargo, se espera que el proceso de funcionamiento de locomotoras automatizadas completamente excluirá los tiempos de inactividades asociados con el cambio de turnos, colaciones y etc (Pilabra, Rio Tinto).

Tabla 19. El cálculo de las horas efectivas antes y después de implementación del sistema robótico.

Nombre	Modo manual	Modo autónomo	Diferencia	Diferencia, %	
Cantidad días hábiles	347	347	-	-	
Horas de calendario de todos turnos al día (h)	24,0	24,0	-	-	
Horas hábiles	8328	8328	-	-	
Horas mantención (h)	-	-	-	-	
Horas disponibles (h)	-	-	-	-	
Horas disponibles	Horas operativas (h)	-	-	-	
	Horas reservas	347	0	347	100%
Horas operativas	Horas efectivas	7981	8328	347	4%
	Horas perdidas	-	-	-	-

- Productividad

Debido la exclusión del tiempo de inactividades, se espera aumentar la productividad de las locomotoras por lo menos a un 4,2%.

Tabla 20. Productividad actual relacionada con tiempo de ciclo tecnológico y tiempos de inactividades

	Modo manual	Modo autónomo	Diferencia	Diferencia, %
Productividad de la locomotora anual, t	2.397.337	2.497.226	99.889	4,2%
Distancia de ciclo, km	14	14	-	-
Capacidad de carga de 1 tren, tkm	33.562.718	33.562.718	-	-
Costo unitario, USD/tkm	0,04	0,038	0,002	4,2%
Costo anual por 1 ferrocarril, USD	1.342.509	1.275.383	67.125	5%
Costo mensual transporte, USD	111.876	106.282	<b>5594</b>	5%

- Fondo de remuneración del personal

Se reporta por la empresa integrador de tecnología la posibilidad de reducir la cantidad de personal a 35%:

Tabla 21. Fondo de remuneración de personal

	Modo manual	Modo autónomo	Diferencia	Diferencia, %

Fondo de remuneración mensual	72.000	46.613	<b>25.387</b>	35%
-------------------------------	--------	--------	---------------	-----

- Ingresos del mineral y concentrado transportado

Tabla 22. Cálculo del ingreso del mineral y concentrado transportados

Aumento de productividad, %	4,2%
Mineral transportado anualmente en modo manual, t	2.397.337
Costo transporte, (% del costo total)	5%
Volumen esperado adicional de la masa transportada anualmente, t	99.889
Coefficiente de salida del producto final	0,47
Precio mercado por tonelada de concentrado (producto final), USD/t.	42
Ingreso extra anual esperado por aumento de producción, USD	98.590,44
Ingreso extra mensual esperado por aumento de producción, USD	8.215,90

- Accidentabilidad

Al introducir la robotización del complejo ferroviario, se selecciona la velocidad de movimiento para que el tren realice un número mínimo de paradas, esto le permite reducir el desgaste y lograr un movimiento óptimo a lo largo de la ruta. La introducción de trenes locomotores robóticos reducirá la carga desigual de los vagones y accidentes relacionados con pasar a la señal prohibida, fallas de los colectores de corriente central, colisión con un obstáculo, cortes en los rieles, entre otros. Al minimizar la cantidad de operadores, se reducirán los accidentes relacionados con el factor humano.

## 6. Estimación de costos esperados para la creación del sistema robótico

A continuación, se presentan las tablas con las características cualitativas y cuantitativas de las inversiones que deben realizarse para automatizar los procesos.

### 6.1 Flota de camiones mineros autónomos

Tabla 23. Estimación de la inversión del sistema autónomo para los camiones mineros

#	Nombre	Costo sin IVA, USD	Cantidad, unidades	Costo total sin IVA, USD
<b>Equipos</b>				
1	Equipo a bordo	327.600	40	13.104.000
2	Equipo a bordo para la pala (control remoto)	20.048	5	100.240
3	Kit de estación de corrección diferencial	19.110	1	19.110
4	Red para transmisión de datos	62.552	1	62.552
5	Kit de cámaras de video vigilancia fija	14.098	1	14.098
6	Equipo del servidor	21.000	1	21.000
7	Puesto de trabajo de operador	4.200	10	42.000
8	Equipo para control de acceso	57.330	1	57.330
9	Equipo a bordo dozers	15.960	3	47.880
10	Equipo a bordo para equipos auxiliares	7.420	10	74.200
11	Equipo monitoreo personal	3.150	50	157.500
<b>TOTAL:</b>				<b>13.699.910</b>
<b>Servicios</b>				
1	Estudio de ingeniería	123.550	1	123.550
2	Instalación y montaje de la estación de corrección diferencial.	2.030	1	2.030
3	Instalación de equipos fijos de transmisión de datos, puesta en marcha de la red	6.510	1	6.510
4	Instalación y configuración de equipos de video vigilancia.	8.148	1	8.148
5	Instalación y configuración de estaciones de trabajo de usuario.	4.655	10	46.550
6	Instalación y configuración de equipos de control y control de acceso.	7.560	3	22.680
7	Instalación y configuración de los equipos a bordo de un camión	12.600	40	504.000
8	Instalación y configuración de los equipos a bordo de la pala	2.380	5	11.900
9	Instalación y configuración de los equipos a bordo de un dozer	2.030	3	6.090
10	Instalación y configuración de los equipos a bordo de un equipo auxiliar	630	10	6.300
11	Instalación y configuración de los equipos a bordo de otros equipos	2.800	1	2.800
12	Instalación y configuración de software.	3.430	40	137.200
13	Puesta en marcha de los equipos de a bordo del camión.	100.800	1	100.800

14	Capacitación de usuarios, puesta en marcha del sistema.	4.375	40	175.000
15	Acompañamiento de un proyecto piloto (1 mes)	3.150	40	126.000
16	Servicio post venta (1 mes)	123.550	1	123.550
<b>TOTAL:</b>				<b>1.279.558</b>
<b>Total Costo Inversión:</b>				<b>14.979.468</b>

El costo de la inversión total para la implementación de los camiones autónomos es 14.979.468 USD.

## 6.2 Perforadora autónoma

Tabla 24. Estimación de la inversión del sistema autónomo para las perforadoras

#	Nombre	Costo sin IVA, USD	Cantidad, unidades	Costo total sin IVA, USD
<b>Equipos</b>				
1	Equipo a bordo	238.000	11	2.618.000
2	Kit de estación de corrección diferencial	19.110	1	19.110
3	Red para transmisión de datos	25.256	1	25.256
4	Equipo del servidor y puesto de trabajo de operador	25.550	4	102.200
5	Equipo a bordo para equipos auxiliares	7.420	5	37.100
6	Equipo monitoreo personal	3.150	10	31.500
<b>TOTAL:</b>				<b>2.833.166</b>
<b>Servicios</b>				
1	Estudio de ingeniería	66.150	1	66.150
2	Instalación y montaje de la estación de corrección diferencial.	2.030	1	2.030
3	Instalación de equipos fijos de transmisión de datos, puesta en marcha de la red	4.620	1	4.620
4	Instalación y configuración de estaciones de trabajo de usuario.	2.835	4	11.340
5	Instalación y configuración de los equipos a bordo de perforadora	15.400	11	169.400
6	Instalación y configuración de los equipos a bordo de un equipo auxiliar	630	5	3.150
7	Instalación y configuración de software.	2.800	1	2.800
8	Puesta en marcha de los equipos de a bordo de perforadora	4.550	11	50.050
9	Capacitación de usuarios, puesta en marcha del sistema.	33.600	1	33.600
10	Acompañamiento de un proyecto piloto (1 mes)	23.800	2	47.600
<b>TOTAL:</b>				<b>390.740</b>
<b>Total Costo Inversión:</b>				<b>3.223.906</b>

## 6.3 Ferrocarril autónomo

Tabla 25. Estimación de la inversión del sistema autónomo para los ferrocarriles

#	Nombre	Costo sin IVA, USD	Cantidad, unidades	Costo total sin IVA, USD
<b>Equipos</b>				
1	Equipo a bordo de la locomotora eléctrica	242.900	13	3.157.700
2	Kit de estación de corrección diferencial	19.110	1	19.110
3	Red para transmisión de datos	25.256	1	25.256
4	Equipo del servidor y puesto de trabajo de operador	25.550	4	102.200
5	Equipo a bordo para equipos auxiliares	7.420	5	37.100
6	Equipo monitoreo personal	3.150	10	31.500
<b>TOTAL:</b>				<b>3.372.866</b>
<b>Servicios</b>				
1	Estudio de ingeniería	66.150	1	66.150
2	Instalación y montaje de la estación de corrección diferencial.	2.030	1	2.030
3	Instalación de equipos fijos de transmisión de datos, puesta en marcha de la red	4.620	1	4.620
4	Instalación y configuración de estaciones de trabajo de usuario.	2.835	4	11.340
5	Instalación y configuración de los equipos a bordo de locomotora eléctrica	15.400	13	200.200
6	Instalación y configuración de los equipos a bordo de un equipo auxiliar	630	5	3.150
7	Instalación y configuración de software.	2.800	1	2.800
8	Puesta en marcha de los equipos de a bordo de ferrocarril	4.550	13	59.150
9	Capacitación de usuarios, puesta en marcha del sistema.	33.600	1	33.600
10	Acompañamiento de un proyecto piloto (1 mes)	23.800	2	47.600
<b>TOTAL:</b>				<b>430.640</b>
<b>Total Costo Inversión:</b>				<b>3.803.506</b>

## 7. Indicadores del impacto económico para evaluar el sistema autónomo implementado

### 7.1 Metodología de análisis económico aplicada

Para realizar un análisis del impacto económico de implementación de los sistemas autónomos se aplican los siguientes indicadores:

- EBITDA (Earnings Before Interest, Taxes, Depreciation and Amortization) es un indicador financiero que muestra el beneficio del proyecto antes de restar los intereses que tienes que pagar por la deuda contraída, los impuestos propios de tu negocio, las depreciaciones por deterioro de este, y la amortización de las inversiones realizadas. El propósito del EBITDA es obtener una imagen fiel de lo que la empresa está ganando o perdiendo en el núcleo del negocio.

El EBITDA se calcula utilizando la siguiente fórmula:

$$EBITDA = I - C,$$

donde I – ingresos, USD;

C – costos operacionales, USD.

- El margen de EBITDA es la relación entre el EBITDA y el total de ventas. Este indicador se puede calcular usando la siguiente fórmula:

$$EBITDA_{margin} = \frac{EBITDA}{I},$$

- Impuesto sobre la renta (Ir) es un impuesto que grava la utilidad del proyecto, se puede calcular utilizando la siguiente fórmula:

$$I_r = (I - C - D_m) \cdot T$$

donde I – ingresos, USD;

C – costos operacionales, USD;

$D_m$  – depreciación mensual, USD;

T – impuesto, % (en el caso de Rusia este valor corresponde a 20%).

- Beneficio neto: es un término existente en contabilidad que se refiere a la diferencia entre ingresos y gastos de cualquier empresa en un periodo determinado. Se calcula utilizando la siguiente formula:

$$B_n = EBITDA - D_m - I_r$$

- FCF (Free Cash Flow) o Flujo de Caja Libre: es una de las diferentes formas de medición de los flujos de efectivo o caja, utilizada en la valoración de proyectos de inversión.

$$FCFi = B_n + D_m - Inv$$

donde Inv – costo inversión, USD.

- El Flujo de caja libre acumulado (FCFai) se calcula utilizando la siguiente fórmula:



$$FCFa_i = \sum_{j=1}^i FCF_j,$$

donde  $i$  – periodo analizado para  $FCFa_i$ .

• Flujo de Caja Descontado (DCF): es una técnica de evaluación de inversiones que, diferente de la técnica de pago de vuelta o la tasa de retorno contable, toma el valor del dinero sobre el tiempo en consideración.

$$DCF = FCF \cdot d,$$

donde  $d$  – descuento, (%).

• NPV (Net Present Value), calcula, a valor presente, el dinero que una inversión generará en el futuro, teniendo en cuenta que el valor real del dinero cambia con el tiempo. NPV se calcula utilizando la siguiente fórmula:

$$NPV = \sum_{i=1}^n \frac{FCF_i}{(1+d)^i},$$

donde FCF - flujo de caja libre en el período de tiempo  $i$ ;

$d$  - tasa de descuento (tasa de rendimiento);

$n$  - número de períodos de tiempo durante los cuales aparecen los flujos de efectivo.

• El Período de Recuperación Descontado (DPBP) es la cantidad de tiempo que le (en años) que el costo inicial de un proyecto sea igual al valor descontado de los flujos de efectivo esperados, o el tiempo que toma el equilibrio de una inversión. Es el período en el que el valor presente neto acumulado de un proyecto es igual a cero.

$$\sum_{i=1}^{DPBP} \frac{FCF_i}{(1+d)^i} = 0$$

## 7.2 Camiones autónomos

Para determinar la eficiencia económica, es necesario determinar la depreciación mensual. Esto se puede hacer usando la siguiente fórmula:

$$D_m = \frac{S_{inv}}{T_a \cdot 12 - 1},$$

donde  $D_m$  – depreciación mensual, USD;

$T_a$  – período de amortización del sistema, años.

$S_{inv}$  – suma de inversión, USD.

Por lo tanto, la depreciación mensual del sistema de automatización para los camiones autónomos es  $D_m = \frac{14.979.468}{6 \cdot 12 - 1} \approx 210.978,4$  USD.

La tabla 20 demuestra los costos de modernización de la flota de camiones para la mina presentada en el estudio de caso (los datos fueron entregados por la empresa minera):

Tabla 26 – Costo de modernización de la flota de camiones mineros y costo mantención (OPEX)

Costo	Valor
Costo de modernización de equipos mensual, USD	57.082
Costo personal de modernización de equipos mensual, USD	7.000
Costo de mantención del taller de camiones mineros mensual, USD	239.028
OPEX mensual, USD	303.110
OPEX anual, USD	3.637.320

En la sección 4.1 se describen las fuentes potenciales de la eficiencia de implementación de los camiones autónomos, a través de las cuales se espera reducir los costos. Luego de valorizar individualmente cada tecnología, se llegó a la conclusión que las principales diferencias en gasto están determinadas por el costo laboral y el costo de neumáticos. En las Tablas 21-22 se muestran los valores cuantitativos del ahorro potencial.

Tabla 27 - Fuentes de ahorro (ingresos) y sus valores cuantitativos

Fuente de ahorros (ingresos)	AÑO 1	AÑO 2	AÑO 3	AÑO 4	AÑO 5	AÑO 6
Ingreso total mensual esperado por aumento de producción, USD	-	2.910.873,60	2.910.873,60	2.910.873,60	2.910.873,60	2.910.873,60
Ahorro (ingreso) del fondo de remuneración mensual, USD	131.157,38	131.157,38	131.157,38	131.157,38	131.157,38	131.157,38
Ahorro (ingreso) de combustible, USD	38.788,80	38.788,80	38.788,80	38.788,80	38.788,80	38.788,80
Ahorro (ingreso) de neumáticos, USD	625.919	625.919	625.919	625.919	625.919	625.919

Tabla 28. Evaluación del proyecto con un aumento en la productividad y reducción de costos.

Periodo, años	1	2	3	4	5	6
Ingresos, USD	9550382,16	44480865,36	44480865,36	44480865,36	44480865,36	44480865,36
OPEX, USD	3637320	3637320	3637320	3637320	3637320	3637320
<b>EBITDA</b>	5913062,16	40843545,36	40843545,36	40843545,36	40843545,36	40843545,36
<b>EBITDA margin</b>	7,42	11,02	11,02	11,02	11,02	11,02
Amortización, USD	2531741,07	2531741,07	2531741,07	2531741,07	2531741,07	2531741,07

Impuesto sobre la renta, USD (Ir)	676264,21	7662360,85	7662360,85	7662360,85	7662360,85	7662360,85
<b>Beneficio Neto, USD</b>	2705056,872	30649443,43	30649443,43	30649443,43	30649443,43	30649443,43
FCF	-9742670,06	33181184,5	33181184,5	33181184,5	33181184,5	33181184,5
<b>FCFa (acumulativo)</b>	-9742670,06	23438514,44	56619698,95	89800883,45	122982068	156163252,5
DCF	-1363973,81	4645365,83	4645365,83	4645365,83	4645365,83	4645365,83
<b>Inversión</b>	14979468	0	0	0	0	0
<b>NPV</b>	-9946339,36	16848263,3	40161256,28	60445029,42	78093190,39	93448202,66

La Tabla 28 demuestra que el proyecto de implementación de los camiones autónomos es rentable dado que NPV es positivo. La tasa de descuento utilizada es de 14%.

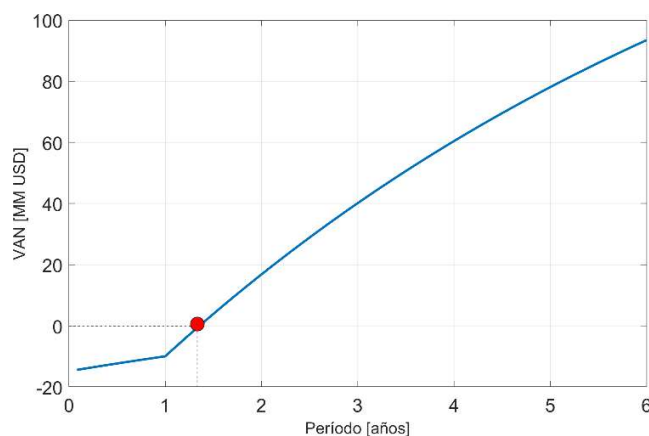


Figura 27. NPV de proyecto de implementación de los camiones autónomos en función del tiempo.

### 7.3 Perforadora autónoma

Para determinar la eficiencia económica, es necesario determinar la depreciación mensual. Esto se puede hacer usando la siguiente fórmula:

$$D_m = \frac{S_{inv}}{T_a \cdot 12 - 1},$$

donde  $D_m$  – depreciación mensual, USD;

$T_a$  – período de amortización del sistema, años.

$S_i$  – suma de inversión, USD.

Por lo tanto, la depreciación mensual del sistema de automatización para los camiones autónomos es  $D_m = \frac{3.223.906}{6 \cdot 12 - 1} \approx 45.407$  USD.

La tabla 24 demuestra los costos de modernización de las perforadoras presentadas en el estudio de caso (los datos fueron entregados por la empresa minera):

Tabla 29 – Costo de modernización de perforadoras (OPEX)

Costo	Valor
Costo de modernización de equipos mensual, USD	11.802
Costo personal de modernización de equipos mensual, USD	7.000
OPEX mensual, USD	18.802
OPEX anual, USD	225.624

Tabla 30 - Fuentes de ahorro (ingresos) y sus valores cuantitativos

Fuente de ahorros (ingresos)	AÑO 1	AÑO 2	AÑO 3	AÑO 4	AÑO 5	AÑO 6
Ingreso extra mensual esperado por aumento de producción, USD		174.580	174.580	174.580	174.580	174.580
Ahorro (ingreso) del fondo de remuneración mensual, USD	40.330,14	40.330,14	40.330,14	40.330,14	40.330,14	40.330,14
Aumento de productividad mensual, USD	33.516	33.516	33.516	33.516	33.516	33.516
Gasto mensual por aumento de consumo de electricidad, USD	-5.881,70	-5.881,70	-5.881,70	-5.881,70	-5.881,70	-5.881,70

Tabla 31. Evaluación del proyecto con un aumento en la productividad y reducción de costos.

Periodo, años	1	2	3	4	5	6
Ingresos, USD	815573,28	2910533,28	2910533,28	2910533,28	2910533,28	2910533,28
OPEX, USD	225624	225624	225624	225624	225624	225624
<b>EBITDA</b>	589949,28	2684909,28	2684909,28	2684909,28	2684909,28	2684909,28
<b>EBITDA margin</b>	8,68	11,07	11,07	11,07	11,07	11,07
Amortización, USD	544885,5211	544885,5211	544885,5211	544885,5211	544885,5211	544885,5211
Impuesto sobre la renta, USD (Ir)	9012,751775	428004,7518	428004,7518	428004,7518	428004,7518	428004,7518
<b>Beneficio Neto, USD</b>	36051,0071	1712019,007	1712019,007	1712019,007	1712019,007	1712019,007
FCF	-2642969,47	2256904,528	2256904,528	2256904,528	2256904,528	2256904,528
<b>FCFa (acumulativo)</b>	-2642969,47	-386064,9435	1870839,585	4127744,113	6384648,641	8641553,169
DCF	-370015,726	315966,634	315966,634	315966,634	315966,634	315966,634
<b>Inversión</b>	3223906	0	0	0	0	0
<b>NPV</b>	-2647547,97	-825043,4056	760650,421	2140303,985	3340689,535	4385100,615

La Tabla 31 demuestra que el proyecto de implementación una plataforma de perforación autónoma es económicamente rentable, dado que NPV es positivo. La tasa de descuento utilizada es de 14%.

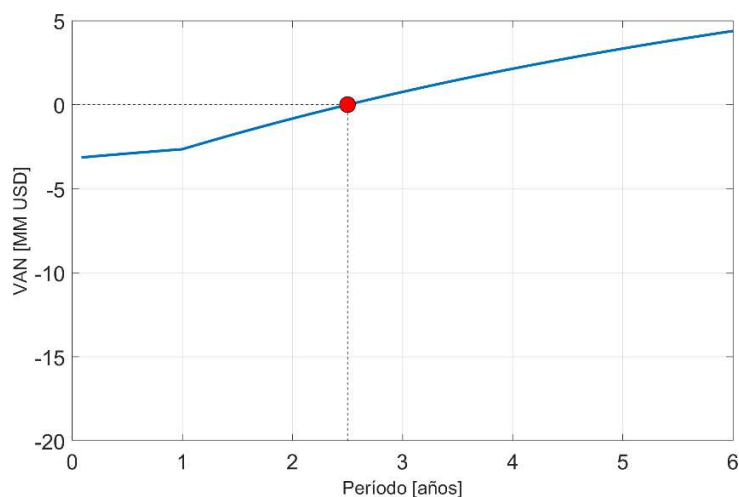


Figura 28. NPV de proyecto de implementación de una plataforma de perforación autónoma en función del tiempo.

### 7.4 Ferrocarril autónomo

Para determinar la eficiencia económica, es necesario determinar la depreciación mensual. Esto se puede hacer usando la siguiente fórmula:

$$D_m = \frac{S_{inv}}{T_a \cdot 12 - 1},$$

donde  $D_m$  – depreciación mensual, USD;

$T_a$  – período de amortización del sistema, años.

$S_{inv}$  – suma de inversión, USD.

Por lo tanto, la depreciación mensual del sistema de automatización un ferrocarril autónomo es

$$D_m = \frac{3.803.506}{6 \cdot 12 - 1} \approx 53.570,50 \text{ USD.}$$

La tabla 32 demuestra los costos de modernización de ferrocarril para la mina presentada en el estudio de caso (los datos fueron entregados por la empresa minera):

Tabla 32 – Costo de modernización de ferrocarril (OPEX)

Costo	Valor
Costo mantención equipos mensual, USD	14.056
Costo personal de modernización de equipos mensual, USD	7.000
OPEX mensual, USD	21056
OPEX anual, USD	252.672

Tabla 33 - Fuentes de ahorro (ingresos) y sus valores cuantitativos

Fuente de ahorros (ingresos)	AÑO 1	AÑO 2	AÑO 3	AÑO 4	AÑO 5	AÑO 6
Ingreso extra mensual esperado por aumento de producción, USD	-	8.215,90	8.215,90	8.215,90	8.215,90	8.215,90
Ahorro (ingreso) del fondo de remuneración mensual, USD	25.387	25.387	25.387	25.387	25.387	25.387
Ahorro (ingreso) de costo transporte, USD	5594	5594	5594	5594	5594	5594

Tabla 34. Evaluación del proyecto de ferrocarril autónomo.

Periodo, años	1	2	3	4	5	6
Ingresos, USD	371772	470364	470364	470364	470364	470364
OPEX, USD	252672	252672	252672	252672	252672	252672
<b>EBITDA</b>	119100	217692	217692	217692	217692	217692
<b>EBITDA margin</b>	3,84	5,55	5,55	5,55	5,55	5,55
Amortización, USD	642846,0845	642846,0845	642846,0845	642846,0845	642846,0845	642846,0845
Impuesto sobre la renta, USD (Ir)	-104749,2169	-85030,8169	-85030,8169	-85030,8169	-85030,8169	-85030,8169
<b>Beneficio Neto, USD</b>	-418996,8676	-340123,2676	-340123,2676	-340123,2676	-340123,2676	-340123,2676
FCF	-3579656,783	302722,8169	302722,8169	302722,8169	302722,8169	302722,8169
<b>FCFa (acumulativo)</b>	-3579656,783	-3276933,966	-2974211,149	-2671488,332	-2368765,515	-2066042,699
DCF	-501151,9496	42381,19437	42381,19437	42381,19437	42381,19437	42381,19437
<b>Inversión</b>	3803506	0	0	0	0	0
<b>NPV</b>	-3551884,274	-3307428,335	-3094736,263	-2909680,755	-2748670,801	-2608581,993

La Tabla 35 demuestra que el proyecto de implementación de un ferrocarril autónomo no es económicamente rentable dado que NPV es negativo. La tasa de descuento utilizada es de 14%.

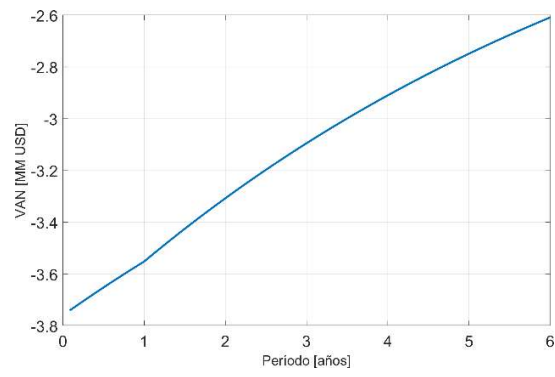


Figura 29. NPV de proyecto de implementación de un ferrocarril autónomo en función del tiempo.

## 8. Montecarlo

Los métodos de Montecarlo corresponden a una variedad de técnicas de muestreo valiéndose de la aleatoriedad de ciertas variables. La idea es realizar una gran cantidad de experimentos repetidamente, como, por ejemplo, lanzar una moneda o un dado.

Para examinar las incertidumbres asociadas al cálculo del NPV (Valor Actualizado Neto), se supondrá que tanto los ingresos como los costos se distribuyen aleatoriamente con una distribución a priori normal:

$$OPEX \sim N(\mu_{gastos}, \sigma_{gastos})$$

$$income \sim N(\mu_{ingreso}, \sigma_{ingreso})$$

Así, se recogen 10.000 muestras aleatorias y se supondrán independientes. Para cada muestra ( $OPEX, income$ ) se calcula el NPV, lo que permite construir una distribución del NPV a posteriori.

Se especifican los promedios  $\mu_{gas}$ ,  $\mu_{ingreso}$  y los coeficientes de variación:  $\frac{\sigma_{gastos}}{\mu_{gastos}}$ ,  $\frac{\sigma_{ingreso}}{\mu_{ingreso}}$ . En este estudio, los coeficientes de variación de ambas variables se fijan en 20%.

Una vez que la distribución de probabilidad a posteriori es estimada, se calcula el VAR (*value at risk*), que corresponde al valor equivalente a un cierto nivel de certeza estadística  $\alpha$ . En este estudio, dicho nivel se fija en  $\alpha = 5\%$ .

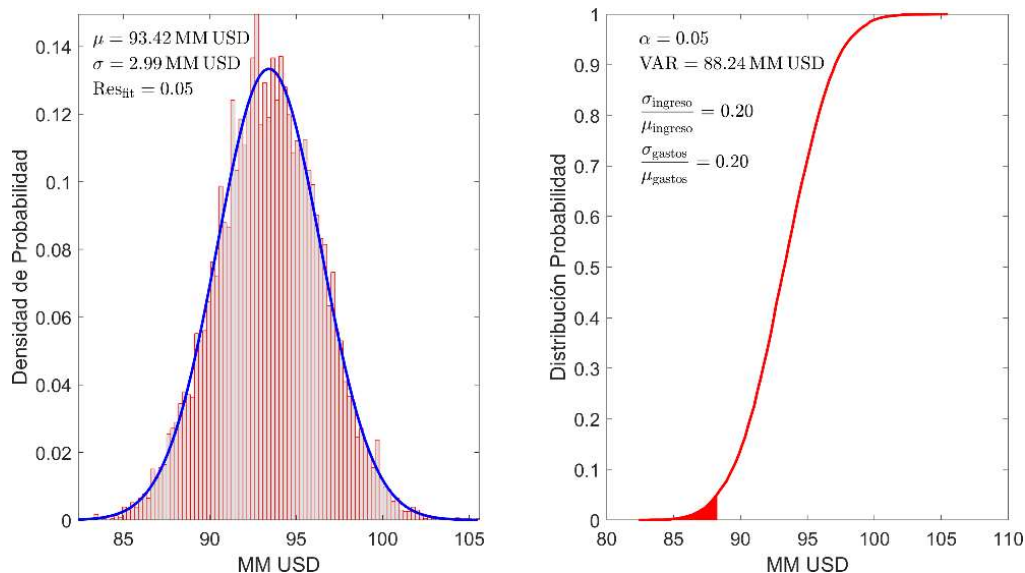


Figura 30: (Izq.) Función de densidad y (der.) distribución de probabilidad empírica para el caso “Camión autónomo”



La figura 30 muestra la distribución a posteriori para el caso de Camión autónomo con el método de Montecarlo y el correspondiente  $VAR$ .

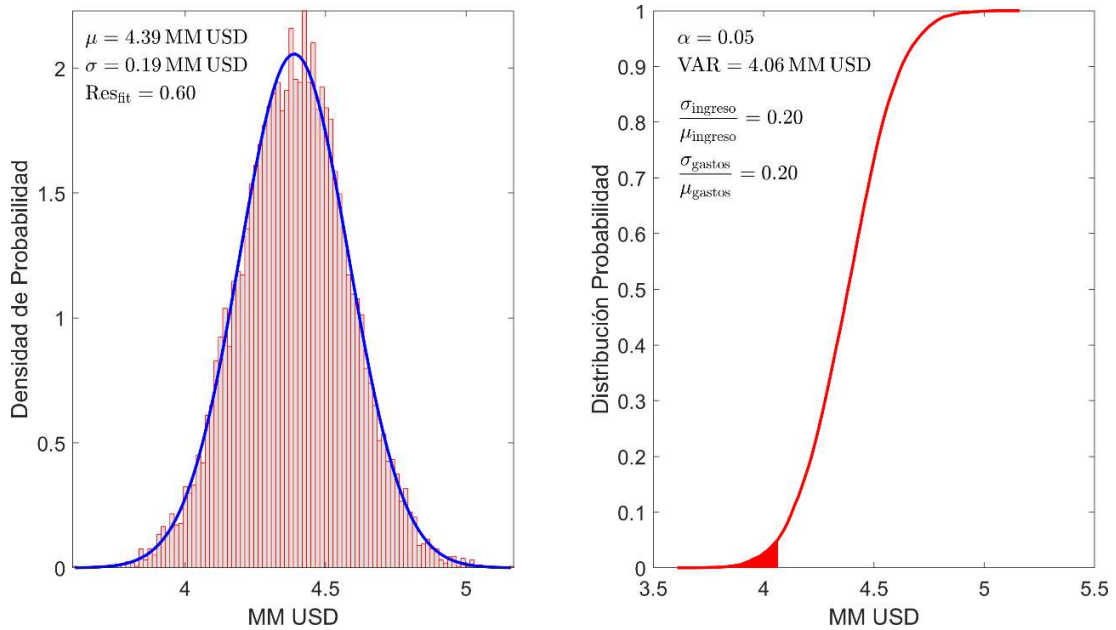


Figura 31: (Izq.) Función de densidad y (der.) distribución de probabilidad empírica para el caso “Perforadora autónoma”

La figura 31 muestra la distribución a posteriori para el caso de Perforadora autónoma con el método de Montecarlo y el correspondiente  $VAR$ .

### Criterio de NPV

Uno de los criterios más comunes a la hora de evaluar un proyecto es que el  $NPV$  sea positivo al final del período del proyecto. Su definición es

$$NPV(n) = \sum_{i=0}^n \frac{F_i}{(1+r)^i}$$

donde  $r$  es la tasa de retorno y  $F_i$  es el flujo de caja en el periodo  $i$ . Puede observarse que  $NPV(n)$  define una función monótona creciente.

Cuando un proyecto no es viable según este criterio al final del período, surge la siguiente pregunta: ¿Cuánto se debe prolongar el proyecto para que este se haga factible? Para responder esta pregunta se tomará como supuesto que el flujo de caja en el tiempo posterior al período  $n$  será constante.

Así, si  $m > n$ , y en virtud de las propiedades de las sumas geométricas, se tiene que

$$NPV(m) = NPV(n) + \frac{F_n}{(1+r)^m} \left[ \frac{(1+r)^m - 1}{r} \right]$$

Nos interesa encontrar, si es posible, el valor de  $m$ , tal que  $VAN(m) > 0$ . Dicha condición se traduce a

$$NPV(n) + \frac{F_n}{r} \left[ \frac{1}{(1+r)^n} - \frac{1}{(1+r)^m} \right] > 0$$

Al despejar se  $m$ , se obtiene que

$$m > - \frac{\ln \left( \frac{1}{(1+r)^n} + \frac{r}{F_n} NPV(n) \right)}{\ln(1+r)}$$

Así, el período mínimo para hacer viable el proyecto es

$$m = \left\lceil - \frac{\ln \left( \frac{1}{(1+r)^n} + \frac{r}{F_n} NPV(n) \right)}{\ln(1+r)} \right\rceil$$

Para que este valor exista, se debe cumplir con la siguiente *condición necesaria*:

$$\frac{1}{(1+r)^n} + \frac{r}{F_n} NPV(n) > 0$$

Si esta condición no se cumple, entonces no existe ningún período  $m$  tal que  $NPV(m) > 0$ . Esto es precisamente lo que ocurre en el caso “Ferrocarril”:

$$\frac{1}{(1+r)^n} + \frac{r}{F_n} NPV(n) = -0.7726$$

Gráficamente, lo que ocurre es que la curva  $(n, NPV(n))$  tiene una asíntota horizontal negativa, es decir,

$$(\exists c < 0), \quad NPV(n) < c, \quad \forall n > 0$$

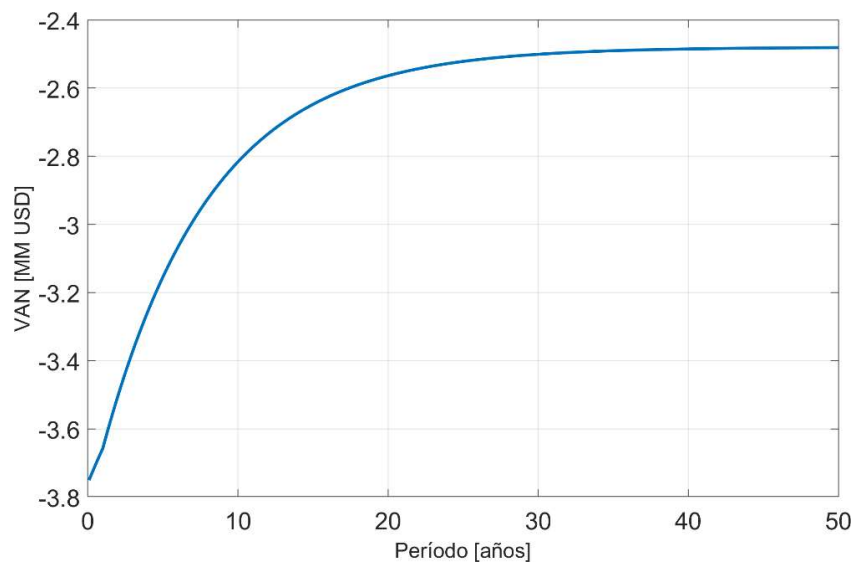


Figura 31: NPV en función del tiempo, para el caso “Ferrocarriles”

## 9. Conclusiones y sugerencias

### 9.1 Conclusiones

En este trabajo fue introducido el estudio de tres casos de robotización de procesos tecnológicos, tales como transporte de mineral mediante camiones, perforación y transporte por ferrocarril; se explican las razones de las soluciones técnicas y tecnológicas, se establecen los factores de eficiencia y se calcula la viabilidad de la implementación. Las principales conclusiones y resultados prácticos del trabajo son los siguientes:

1) Se presentó un análisis del estado actual de las tecnologías, las perspectivas y tendencias generales en el desarrollo de sistemas de control automatizados para el complejo de minería y transporte, la viabilidad técnica y tecnológica de creación y uso de los sistemas robóticos.

2) Se formularon y se justificaron las limitaciones de crear una tecnología robótica para cada una de las unidades:

- **Camiones autónomos:** la disposición de la zona piloto para desarrollar un sistema robótico de transporte de carga se evalúa como alta. La preparación del rajo principal para implementación de equipos robóticos se evalúan como alta-mediana. La presencia del sistema de control automatizado de flota demuestra una alta preparación organizativa para la transición a un sistema de transporte de carga robótica.

- **Perforadoras autónomas:** la preparación de la zona de perforación se evalúa como alta. Se recomienda comenzar la implementación piloto con robotización de dos equipos.

- **Ferrocarriles autónomos:** el sistema de control implementado permite integrar el sistema de ferrocarriles robóticos. Se recomienda considerar por separado la preparación de pistas y el control de derrames (posiblemente utilizando análisis de video en locomotoras). El grado de preparación del transporte ferroviario para la robótica se estima como mediano.

3) La Sección 4 describe los requisitos técnicos y la arquitectura de la solución para implementar un camión autónomo, plataformas de perforación robóticas y transporte ferroviario automatizado. Se definen los requisitos generales para la organización de la infraestructura de un sistema robótico de transporte de carga y ferrocarriles, la gestión de plataformas de perforación robóticas y se justifican las condiciones tecnológicas para su implementación: filosofía operacional; intersección de las rutas; acceso a la excavadora; carga y descarga; las condiciones y las reglas básicas de seguridad.

4) Se propusieron los principales factores para aumentar la eficiencia mediante implementación de los sistemas robóticos, se propuso una metodología para evaluación de la viabilidad económica. Al evaluar los indicadores de viabilidad económica, se consideraron los siguientes escenarios:

- **Camiones autónomos:** aumento de la productividad del transporte a través de robots.

NPV: 93.4 MM USD.

- **Perforadoras autónomas:** optimización de los procesos de perforación.

NPV: 4.4 MM USD;

- **Ferrocarriles autónomos:** aumento de productividad del transporte ferroviario.

NPV: -2,6 MM USD.

### 9.2 Comparación de los resultados esperados de la creación con los equipos robóticos con los objetivos y criterios establecidos

### **Camiones autónomos**

Con base en los parámetros de efectividad del proyecto calculados bajo el escenario propuesto de aumento de la productividad, se concluye que es aconsejable seguir el escenario propuesto, dado que en este caso se cumple el criterio de NPV positivo.

Los cálculos realizados en la sección 7.2 demuestran que los objetivos establecidos son comparables con el resultado esperado.

### **Perforadoras autónomas**

En la sección 7.3 se realizó la evaluación de escenario de reducción de costos de perforación y los resultados demuestran que la inversión se devolverá rápidamente.

Además, aunque el escenario de aumento de eficiencia por reducir el volumen de explosivos no se pudo analizar debido a la falta de datos precisos, se puede observar que el escenario de reducción de costos es más adecuado. El escenario de aumento de la productividad es menos adecuado debido a la imposibilidad de aumentar el número de bloques para perforación.

Los cálculos realizados en la sección 7.2 mostraron que los objetivos establecidos son comparables con el resultado esperado.

De todo lo anterior se deduce que es aconsejable la introducción de un sistema automatizado de control de la plataforma de perforación, y cuando se implementa, es aconsejable seguir el escenario de reducción de costos.

### **Ferrocarril autónomo**

Basándose en las características del taller de transporte ferroviario y al realizar un análisis de los parámetros de rendimiento del proyecto, se puede concluir que la introducción de un sistema automatizado de control de locomotoras en la mina analizada para el estudio de caso no es conveniente por las siguientes razones:

- Se ve complejo localizar una zona robótica separada;
- El equipo robótico depende del servicio de seguimiento, así como en caso del equipo de control manual;
- Solo un tercio de las locomotoras eléctricas disponibles pueden ser modernizadas;
- La reducción de costos y el crecimiento de los ingresos en caso de automatización no son significativos;
- El parámetro indicado (NPV) no cumple con el criterio de aceptación.

## **9.3 Sugerencias**

Como resultado de este trabajo se proponen tres escenarios que permitirán mejorar los procesos de producción:

**Escenario 1:** implementación de los equipos, los cuales resultan ser, según este estudio, económicamente viables: plataforma de perforación y camión autónomo. Se sugiere iniciar la primera etapa del proyecto con el lanzamiento piloto de plataforma de perforación, ya que esto requerirá la preparación mínima en términos de infraestructura. La segunda etapa es el lanzamiento

piloto de camiones autónomos. Estas etapas se llevan a cabo secuencialmente para la carga mínima en la empresa minera, dando tiempo para la actualización sistemática de las regulaciones y los estándares de trabajo. Después de completar las dos primeras etapas, se recomienda comenzar el lanzamiento de las perforadoras y camiones autónomos a escala.

**Escenario 2:** implementación del complejo de las tecnologías robóticas en la mina a cielo abierto. A pesar de que en este trabajo se confirma que la introducción de locomotoras eléctricas robóticas no es factible desde un punto de vista económico, es evidente que la automatización del transporte ferroviario mejorará de manera importante la seguridad del proceso de transporte. Esta opción es compleja en términos de cambios en los enfoques organizacionales. Sin embargo, para este escenario se recomienda iniciar el proceso con implementación de las tecnologías robóticas con los camiones y transportes ferroviarios.

**Escenario 3:** implementación de los pilotos de tres tecnologías elaboradas simultáneamente.

La tabla 26 refleja el resumen de 3 escenarios elaborados con sus ventajas y desventajas y tiempo estimado de implementación

Tabla 35. Comparación de los escenarios propuestos

	Descripción	Ventajas	Desventajas	Duración de implementación del proyecto completo
<b>Escenario 1:</b> Camiones y perforadoras autónomos	Implementación de plataforma de perforación y camiones autónomos.  1 etapa: lanzamiento de pilotos de plataformas de perforación.  2 etapa: lanzamiento de pilotos de camiones autónomos.  Al completar las dos primeras etapas, se recomienda comenzar lanzamiento de las perforadoras y camiones autónomos a la escala.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La implementación secuencial por fases permite desarrollar los reglamentos y normas de seguridad para la operación de robots, facilitando el cambio organizacional de la empresa.</li> <li>• Se puede formar un equipo clave en cargo de proyecto de automatización para ambas implementaciones.</li> <li>• Inversión mínima en la etapa inicial.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• El período de implementación más largo;</li> <li>• El proyecto no involucra automatización del ferrocarril.</li> </ul>	60 meses
<b>Escenario 2:</b> Automatización completa	La implementación se lleva a cabo de acuerdo con el esquema de escala piloto. Los pilotos y las implementaciones comienzan se realizan en paralelo.  Se implementan los camiones autónomos y ferrocarril. En las plataformas de perforación se implementa un sistema de navegación de alta precisión como base para la robotización.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Posibilidad de obtener el máximo efecto sobre el rendimiento;</li> <li>• Introducción de pilotos en poco tiempo;</li> <li>• Desarrollo de los reglamentos necesarios para el escalado más rápido posible.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Trabajo simultáneo en varios departamentos de empresa para cambiar los enfoques organizacionales;</li> <li>• Alta carga en el equipo del proyecto;</li> <li>• Riesgo de reducción de la productividad en el momento de la implementación.</li> </ul>	48 meses
<b>Escenario 3:</b> Implementación de pilotos	Implementación de pilotos simultáneamente por un periodo fijo (hasta 2 años), desarrollo de	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Oportunidad de obtener experiencia en la operación de robots tanto para</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alta carga en el equipo del proyecto.</li> <li>• Se requieren inversiones en proyectos piloto para</li> </ul>	20 meses

	reglamentos para evaluación del rendimiento del proyecto.	<p>camiones, como para perforadoras y ferrocarriles;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Actualización del modelo económico de tecnología basándose en datos reales de la empresa;</li> <li>• Creación de la infraestructura y reglamentos para el escalado de tecnología en futuro.</li> <li>• Con base en los resultados y la factibilidad económica, se toma la decisión sobre la posibilidad de escala.</li> </ul>	todas las áreas al mismo tiempo.	
--	---	---	----------------------------------	--

## BIBLIOGRAFÍA

Ansaldo STS. Train Control and Signalling Systems and Services. [En línea]. January, 2017. <<https://www.railway-technology.com/contractors/signal/ansaldo-sts/>>

Applebee, L. 2019. Komatsu P&H surface drill makes for safer operation through automation. Australian Mining.

ASI. About Robotic Haul Trucks from ASI. [En línea]. March, 2020. <<http://asirobots.com/mining/haultruck/>>

ASI. Automated Drilling & Blasting. [En línea]. January, 2017. <<https://www.asirobots.com/mining/autonomous-drilling-blasting/>>

Banks, J. 2020. How Fortescue Metals Group is looking beyond Pilbara in 2020. NS Energy.

Bellami, D. Pravica, L. 2010. Assessing the impact of driverless haul trucks in Australian surface mining. Elsevier.

Bird, D. Beal, C. 2019. Report 2 – Autonomous Mining Equipment. New Technology Innovation. RFC Ambrian.

Caterpillar. Caterpillar to support Rio Tinto in creating technologically advanced Koodaideri mine. [En línea]. November, 2019. <[https://www.cat.com/en\\_US/by-industry/mining/articles/rio-tinto-koodaideri.html](https://www.cat.com/en_US/by-industry/mining/articles/rio-tinto-koodaideri.html)>

Chaowasakoo, P. Seppälä, H. Koivo, H. Zhou, Q. Digitalization of mine operations: Scenarios to benefit in real-time truck dispatching. International Journal of Mining Science and Technology. ELSEVIER

Cotteleer, M. Sniderman, B. 2017. Forces of change: Industry 4.0. Delloite. Insights, pp 2-3.

Cranenburgh, N. 2018. How mining company BHP remotely derailed a runaway train. Creat, Auatralia.

Dessureault S., Scoble M. J. 2000. Capital investment appraisal for the integration of new technology into mining systems, Mining Technology, 109:1, 30-40, DOI: 10.1179/mnt.2000.109.1.30

E&M Engineering and Mining Journal. Drilling in the Digital Age. [En línea]. September, 2019. <<https://www.e-mj.com/features/drilling-in-the-digital-age/>>

Flanders. Improve drill production and keep your people safe. Industry-leading technology for improving mining drill performance. [En línea]. February, 2020. <<https://www.flandersinc.com/machines/drills/>>

Gutierrez Q. D. 2013. Maquinaria minera. Monografía.

HITACHI. Robot Trains: How Hitachi Rail Tech Enabled Global First in Heavy Freight Rail Automation. [En línea]. January, 2020. <[https://social-innovation.hitachi/en-au/case\\_studies/robot-trains](https://social-innovation.hitachi/en-au/case_studies/robot-trains)>



HITACHI. Railway Systems. [En línea]. January, 2017. <[https://www.hitachi.com/rev/archive/2017/r2017\\_04/eC02/index.html](https://www.hitachi.com/rev/archive/2017/r2017_04/eC02/index.html)>

HITACHI. Creating the world's largest robot. [En línea]. January, 2017.< <https://social-innovation.hitachi/en-au/about/our-social-innovators/AutoHaul-train>>

Jamasmie, C. 2018. Vale truck fleet at Brazil mine going fully autonomous in 2019. Intelligence Africa Latin America Iron Ore.

International Mining. Whitehaven Coal reveals cost benefits of autonomous haulage with Hitachi. [En línea]. September, 2019. <<https://im-mining.com/2019/09/18/whitehaven-coal-reveals-cost-benefits-of-autonomous-haulage-with-hitachi/>>

Kalinin, A.V. 2017. Control de locomotora sin la participación del conductor. Principios básicos y perspectivas del desarrollo tecnológico. ITNOU: tecnologías de la información en ciencia, educación y gestión. No. 1 (1).

Komatsu. Electric drive mining truck 930-4. [En línea] Octubre, 2019. <<https://www.komatsuamerica.com/equipment/trucks/electric/930e-4>>.

Mining Magazine. BHP to double autonomous trucks at Jimblebar. [En línea]. July, 2017. <<https://www.miningmagazine.com/innovation/news/1331400/bhp-to-double-autonomous-trucks-at-jimblebar>>

Mining Magazine. RCT completes Russian installation. [En línea]. January, 2019.< <https://www.miningmagazine.com/fleet/news/1353974/rct-completes-russian-installation>>

Mining Technology. Deep impact: Atlas Copco takes automated drilling to the next level. [En línea]. November, 2017. <<https://www.mining-technology.com/features/deep-impact-atlas-copco-takes-automated-drilling-next-level/>>

Mc Nab, K. Garcia-Vasquez, M. 2011. Autonomous and remote operation technologies in Australian mining. Cluster Research Report No. 2.5.

Railway Gazette International. SNCF targets autonomous trains in five years. [En línea]. September, 2018. <<https://www.railwaygazette.com/traction-and-rolling-stock/sncf-targets-autonomous-trains-in-five-years/47165.article>>

RCT.Remote. [En línea]. June, 2014. <<https://rct-global.com/automation-control/remote/>>

Romanchikov, A.M. 2014. Bombardier Transportation (Signal): el tráfico de alta velocidad es la realidad. Euroasia Vesti.

Sysoev, V. 2019. Epiroc's world leading automation solutions brings Apatit JSC to new levels.

The West Australian. Rio Tinto hits \$1.3b driverless Pilbara trains target. [En línea]. December, 2018. <<https://thewest.com.au/business/mining/rio-tinto-hits-13b-driverless-pilbara-trains-target-ng-b881059826z>>

Vale. Vale Will Begin Tests on Autonomous Operation of Haul Trucks in Carajás. [En línea] October, 2017.<<http://www.vale.com/brasil/EN/aboutvale/news/Pages/vale-will-begin-tests-on-autonomous-operation-of-haul-trucks-in-carajas.aspx>>

