

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



Evaluación técnico-económica de un caso de estudio
de perforadoras autónomas

Presentado por

GREEK EDUARDO SAN MARTÍN VIVES

MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL DE MINAS

Profesor guía

DR. (c) CARLOS HUNT R.

Profesor CO-guía

MBA ANDRÉS MUJICA M.

SANTIAGO, MAYO 2023

RESUMEN EJECUTIVO

Las perforadoras autónomas han mejorado la forma en que se lleva a cabo el proceso de perforación en minería, utilizando tecnologías avanzadas para realizar perforaciones de manera independiente, buscando mejorar la eficiencia y seguridad en las operaciones mineras. Sin embargo, pasar de una perforación manual en cabina a autónoma no es “plug & play”. En la perforación autónoma se requieren condiciones específicas de operación que tienen diferencias con la perforación en cabina convencional.

El objetivo de esta memoria es entregar factores claves sobre la correcta implementación de perforadoras autónomas, visualizando las variables que se ven involucradas dentro de la incorporación de una nueva tecnología. Además, este trabajo incluye una descripción de la tecnología autónoma de perforadoras, una comparativa con el proceso de perforación manual junto con sus respectivos beneficios, limitaciones y riesgos que involucra la incorporación de la autonomía.

La metodología utilizada para evaluar técnica y económicamente la autonomía de perforadoras comienza por delinear los requerimientos de infraestructura y protocolos que se deben tener presentes para la autonomía de perforadoras, establecer la línea base de una operación manual de perforadoras con sus respectivos KPI (disponibilidad, utilización y rendimientos), luego incorporar las mejoras asociadas a la autonomía y evaluar los metros por perforadora al año para ambos escenarios. Finalmente, se dimensiona la flota autónoma, y se establecen los costos asociados a la incorporación de la autonomía para identificar el escenario más beneficioso del caso ejemplo.

Al realizar la evaluación técnico-económica de la perforación con PV 271 convencional versus PV 271 y PV 351 autónomas, los principales resultados reflejan un aumento en el uso de equipos de perforación, mejores rendimientos por una reducción de la re-perforación de pozos y una disminución en los tiempos de cambio entre pozos y una reducción de personal requerido para operar. Al realizar el dimensionamiento, se obtiene un ahorro de 2 a 4 equipos de perforación. Lo anterior se traduce en un menor costo de operación y un beneficio de la autonomía de 14.1 y 16.7 MUSD\$ respecto al caso base de perforación manual.

La gran diferencia entre los equipos de perforación manuales y autónomos es la capacidad de perforar una larga secuencia de pozos, incluyendo la perforación y el traslado entre pozos de manera segura, precisa y sin la necesidad de un operador a bordo.

El éxito de una correcta implementación de la autonomía de perforadoras va a depender del apego de la operación a contar con los requerimientos mínimos exigidos por la tecnología, tales como una adecuada red de comunicaciones, estándares operacionales, y una gestión del cambio acorde, de manera que permita aprovechar la autonomía y sus beneficios.

ABSTRACT RESUME

Autonomous drill rigs have improved the drilling process in mining by utilizing advanced technologies to independently carry out drilling operations, aiming to enhance efficiency and safety. However, transitioning from manual cabin drilling to autonomous drilling is not a "plug & play" process. Autonomous drilling requires specific operating conditions that differ from conventional cabin drilling.

The objective of this report is to provide key factors for the successful implementation of autonomous drill rigs, considering the variables involved in adopting new technology. Additionally, this work includes a description of autonomous drill rig technology, a comparison with manual drilling processes, and their respective benefits, limitations, and associated risks.

The methodology used to evaluate the technical and economic aspects of autonomous drill rigs begins by outlining the infrastructure requirements and protocols necessary for autonomous drilling. It establishes a baseline for manual drill rig operations with their respective key performance indicators (availability, utilization, and performance). Then, it incorporates the improvements associated with autonomy and evaluates the meters drilled per drill rig per year for both scenarios. Finally, it determines the autonomous fleet size and identifies the costs associated with implementing autonomy to identify the most beneficial scenario for the case study.

When conducting the technical and economic evaluation of conventional PV 271 drilling versus autonomous PV 271 and PV 351 drilling, the main results show an increase in drill rig utilization, improved performance due to reduced re-drilling of wells, shorter transition times between wells, and a decrease in the required personnel to operate. Through dimensioning, a savings of 2 to 4 drill rigs is achieved. This translates into lower operating costs and autonomy benefits of 14.1 and 16.7 million USD compared to the manual drilling baseline.

The significant difference between manual and autonomous drill rigs is the ability to drill a long sequence of wells, including drilling and moving between wells safely, accurately, and without an operator on board.

The success of implementing autonomous drill rigs depends on adhering to the minimum requirements demanded by the technology, such as a reliable communication network, operational standards, and appropriate change management. This allows for harnessing the benefits of autonomy effectively.

Índice:

RESUMEN EJECUTIVO	2
ABSTRACT RESUME	3
1. Introducción.....	11
1.1. Objetivos.....	12
1.1.1. Objetivo General.....	12
1.1.2. Objetivos Específicos	12
1.2. Alcances	12
2. Marco teórico.....	13
2.1. Proceso de perforación.....	13
2.2. Tecnología de perforación autónoma (ADS).....	15
2.2.1. Visión general del sistema autónomo de perforadoras (ADS)	15
2.3. ADS en el mundo.....	16
2.4. Factores habilitantes para la tecnología ADS	17
2.4.1. Componentes	17
2.4.2. Integración a la red de comunicaciones.....	18
2.4.3. Posicionamiento satelital	19
2.4.4. Personal requerido para implementar ADS	20
2.4.5. Personal de soporte para ADS	21
2.4.6. Personal de operación de ADS	21
2.4.7. Capacitaciones	22
2.4.8. Infraestructura de operación	22
2.4.9. Repuestos críticos de operación	24
2.5. Sistemas de seguridad en autonomía	24
2.5.1. Safe to Board (STB)	24
2.5.2. Sistema de parada de emergencia.....	25
2.5.3. Detección de obstáculos	26
2.6. Funcionamiento del sistema ADS.....	27
2.6.1. Automatización.....	27
2.6.2. Nivelación automática	28

2.6.3.	Autodrill	28
2.6.4.	Cambio automático de broca	29
2.6.5.	Puntos de paso auto generados	30
2.6.6.	Salud de la perforadora.....	30
2.6.7.	Seguimiento automatizado de consumibles.....	30
2.6.8.	Ajuste de parámetros de perforación en base a dureza del terreno	30
2.6.9.	Ciclo completo perforación autónoma	31
2.7.	Modelo de uso de tiempos	32
2.8.	Estándares perforación autónoma	33
2.8.1.	Requerimientos para el comisionamiento.....	33
2.8.2.	Requerimientos para preparación del patio	34
3.	Metodología y desarrollo del estudio	39
3.1.	Metodología	39
3.2.	Escenarios a evaluar.....	40
4.	Dimensionamiento técnico de perforadoras autónomas	41
4.1.	Plan de producción.....	41
4.2.	KPI perforación manual	42
4.3.	Flota de perforadoras y dotación caso manual.....	43
4.4.	Mejoras a modelo de uso de tiempos	45
4.5.	Demoras e indisponibilidades asociadas a tecnología ADS	49
4.6.	Rendimientos ADS	50
4.7.	Dimensionamiento caso ADS	50
4.7.1.	Metodología dimensionamiento de perforadoras	50
4.7.2.	Dimensionamiento de perforadoras autónomas	51
4.7.3.	Dotación personal de autonomía	56
4.7.4.	Plan táctico de implementación.....	58
5.	Valorización escenarios	59
5.1.	Costos habilitantes tecnología autónoma.....	59
5.2.	Ahorros y beneficios económicos de la autonomía	63
5.3.	Costo de mantenimiento	64
6.	Análisis de resultados	65

6.1.	Indicadores	65
6.2.	Requerimiento de equipos	65
6.3.	Requerimientos dotacionales	66
6.4.	Waterfall de autonomía.....	66
7.	Conclusiones y recomendaciones	69
8.	Referencias	72

Índice de Figuras

Figura 1. Perforación de producción	14
Figura 2. Lookup de la tecnología ADS.....	15
Figura 3. ADS en el mundo para Epiroc y Flanders.....	17
Figura 4. Elementos que componen el sistema de autonomía de perforadora.	18
Figura 5. Diagrama conceptual de redes de comunicación.	19
Figura 6. Ejemplo de oficina Teleremote.	23
Figura 7. Semáforos de luz en perforadora autónoma.....	25
Figura 8. Interpretación semáforos de luz en perforadora autónoma.	25
Figura 9. Ubicación de los láseres para una PV271.	26
Figura 10. Nivelación automática en perforadora autónoma.	28
Figura 11. Ciclo de sistema AutoDrill.....	29
Figura 12. Relación dureza del terreno vs velocidad de penetración de perforadora.....	30
Figura 13. Ciclo de perforadora autónoma.....	31
Figura 14. Modelo de uso de tiempos ASARCO.	32
Figura 15. Ejemplo de diseño berma de seguridad.....	34
Figura 16. Geocerca en proceso de perforación autónoma.	36
Figura 17. Gráfica de espaciado y carga entre pozos en una fila.	37
Figura 18. Espacio mínimo para pozos desde berma	37
Figura 19. Diagrama de espaciamiento entre equipos.....	38
Figura 20. Flujo de metodología para implementación de perforadoras autónomas.....	39
Figura 21. Características de desempeño para equipos evaluados.	40
Figura 22. Escenarios a evaluar con tecnología ADS.	40
Figura 23. Factor dotacional para el ejercicio a estudiar.	44
Figura 24. Metodología de cálculo para dimensionar perforadoras.	51
Figura 25. Resultados promedio del ejercicio para PV271.	55
Figura 26. Resultados promedio del ejercicio para PV351.	55
Figura 27. Costos de inversión tecnología autónoma.....	60
Figura 28. Costos de operación tecnología autónoma.....	60
Figura 29. Costos totales asociados a incorporar tecnología con modelo PV271.....	62
Figura 30. Costos totales asociados a incorporar tecnología con modelo PV351.....	62
Figura 31. Cambio en indicadores para escenarios estudiados.	65
Figura 32. Waterfall asociado a PV271 autónoma.	67
Figura 33. Waterfall asociado a PV351 autónoma.	67

Índice de Tablas

Tabla 1. Espaciamiento mínimo entre equipos según modelo de perforadora.	38
Tabla 2. KPI de perforación PV271 Manual.	42
Tabla 3. Configuración días descontados	43
Tabla 4. Dotación de operadores de perforadoras manuales.	44
Tabla 5. Mantención programada con ADS.	45
Tabla 6. Mantención no programada con ADS.	46
Tabla 7. Demoras programadas en ADS.	46
Tabla 8. Demoras No Programadas en ADS.	47
Tabla 9. Reservas con ADS.	48
Tabla 10. Comparación de indicadores Manual – autónomo.	49
Tabla 11. Parámetros de desempeño por equipo de perforación autónoma.	50
Tabla 12. Índices de perforación y toneladas tronadas por pozo según equipo.	52
Tabla 13. Rendimientos efectivos perforadoras evaluadas.	52
Tabla 14. Operadores en sala según número de perforadoras autónomas.	57
Tabla 15. Número de operadores en sala para PV271.	57
Tabla 16. Número de operadores en sala para PV351.	57
Tabla 17. Personal de supervisión por perforadora autónoma.	57
Tabla 18. Supervisores de patio para PV271 autónoma.	57
Tabla 19. Supervisores de patio para PV351 autónoma.	57
Tabla 20. Costos de operación según equipo.	63
Tabla 21. Costo de operación en el largo plazo para los escenarios a evaluar.	64
Tabla 22. Costo total de mantenimiento por modelo.	68

Índice de Gráficos

Gráfico 1. Plan de producción a analizar.....	41
Gráfico 2. Plan de producción con segregación estéril / mineral.	42
Gráfico 3 Requerimiento de perforadoras manuales según plan minero.....	43
Gráfico 4. Requerimiento (miles de metros) según equipos, de metros por perforar.....	52
Gráfico 5. Requerimiento de flota manual y autónomas en LOM.	56
Gráfico 6. Utilización actualizada en perforadoras autónomas.	56

1. Introducción

La minería es una de las industrias más importantes y fundamentales para el desarrollo económico de muchos países. A lo largo de los años, la industria ha visto necesidad de implementar diferentes tecnologías para mejorar la eficiencia, productividad y la seguridad en las operaciones mineras. Una de estas tecnologías corresponde a las perforadoras autónomas; una máquina que ha mejorado la forma en que se lleva a cabo el proceso de perforación en minería a rajo abierto. La perforadora autónoma utiliza tecnologías avanzadas para realizar perforaciones de manera independiente, lo que ha mejorado significativamente la eficiencia y la seguridad en las operaciones mineras (*Minería y Futuro, 2021*) [1].

La perforación de producción corresponde a uno de los procesos más importantes dentro de la minería a rajo abierto, condicionando las cargas de explosivos, los cuales fragmentan el material para ser trasladados, y, además, son los encargados de entregar la forma deseada del rajo en cuestión, considerando la estabilidad de los taludes, y la condición de los pisos de carga (*Energía en Minería | Perforación, 2021*). [2]

Cabe destacar que, hasta hace poco tiempo, previo a la automatización de las perforadoras, un operador podía manipular una perforadora a la vez, mientras que con esta tecnología es capaz de operar hasta 3 al mismo tiempo. Requiriendo una menor dotación de operadores para la misma labor con iguales o mejores resultados, incluso evitando la exposición de estos a eventos de peligro inherentes a la operación minera (*Energía en Minería | Incorporación de Perforadoras autónomas, s. f.*) [3].

La principal problemática asociada a esta tecnología es que esta no es “plug & play” para el paso de una operación manual a autónoma, donde se requieren estándares, procedimientos, condiciones mínimas, preparaciones, entre otros, para poder lograrlo. Debido a eso, en este estudio, se explorarán en profundidad las características y beneficios de la perforación autónoma, sus requerimientos, así como su posible aplicación en el caso de una mina a rajo abierto del norte de Chile.

Además, se examinarán los desafíos y limitaciones que enfrenta esta tecnología, ofreciendo recomendaciones para su uso efectivo y seguro en la industria minera, otorgando lineamientos generales de cómo realizarlo en términos de requerimiento de infraestructura, cambios organizacionales, su implicancia en la operación, además de los respectivos costos y ahorros involucrados.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo General

Entregar los factores claves de implementación para incorporar perforadoras autónomas a una operación minera.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Explicar cómo funciona la tecnología de perforadoras autónomas
- Establecer indicadores para determinar el rendimiento de una flota autónoma
- Dimensionar flota de perforadoras autónomas
- Comparar una operación manual con una operación autónoma de perforadoras
- Aplicar metodología en un caso de estudios de una mina a rajo abierto del norte de Chile
- Realizar evaluación técnica-económica de un caso de perforadoras autónomas

1.2. Alcances

- Se trabajará con información entregada por determinados proveedores que cuentan con la tecnología de autonomía de perforadoras de producción.
- La valorización económica afín a los costos de la tecnología se hizo con referencias de proyectos realizados anteriormente.
- El ejercicio apunta principalmente al funcionamiento de la tecnología autónoma, donde los rendimientos de los equipos se asumieron uniformes en todos los sectores de la mina.
- La mina del norte de Chile contempla un plan de producción desde los años 2025 a 2040, con el cual se desarrollará la potencial implementación de la tecnología
- La evaluación económica se realiza con información de costos referenciales de la tecnología autónoma.
- Este trabajo no considera la evaluación de la tecnología con distintos proveedores.
- Se trabajará evaluando dos tipos de perforadoras de producción, no se realizará el ejercicio considerando una mezcla de modelos en la flota.

2. Marco teórico

2.1. Proceso de perforación

La perforación es el proceso inicial que forma parte de la etapa de extracción en la minería de rajo abierto, cuyo fin es formar una cavidad cilíndrica al interior del macizo rocoso con el objeto de preparar tronaduras. Este proceso, se realiza mediante métodos fundamentalmente mecánicos, los que se pueden subdividir en dos principales categorías: la perforación rotativa y la de percusión.

En el caso de la **perforación rotativa**, la herramienta barrena la roca por la acción conjunta de un torque de rotación y una determinada fuerza de empuje; en el caso de la **perforación de percusión**, en ésta la herramienta penetra la roca a causa de impactos sucesivos de alta frecuencia y energía. Por otra parte, los métodos rotativos se subdividen en dos grupos dependiendo del tipo de broca a emplear, reconociéndose el sistema de corte y de trituración rotativa; en tanto los métodos basados en percusión se subdividen en percusión en cabeza y percusión en fondo. En cuanto a la selección del método de perforación a emplear, esta debe basarse en las características físicas, geométricas y operacionales de la mina, tales como rendimientos exigidos, envergadura de las tronaduras, entre otros (*Energía en Minería | Perforación*, 2021). [2]

La construcción de los pozos o tiros de perforación considera la ejecución de las siguientes actividades:

1. Programación de la ubicación y características de los pozos a perforar,
2. Selección de las herramientas a emplear,
3. Acondicionamiento de la zona de trabajo,
4. Posicionamiento de equipos,
5. Nivelación,
6. Coronamiento,
7. Perforación,
8. Retiro de barras,
9. Retiro y muestreo de detritus,
10. Verificación de calidad y cantidad de tiros perforados,
11. Retiro de equipos.

El número de pozos a perforar, su ubicación y características propias respecto a otros pozos definen una malla o diagrama de perforación, la que guardará relación con las características de la roca, infraestructura de la mina y equipos disponibles.

En el caso del presente estudio, se analizará el proceso de perforación en una mina a rajo abierto, en este caso, cuando los yacimientos se caracterizan por tener una forma regular y estar próximos a la superficie, se lleva a cabo la explotación de los minerales a rajo abierto, la cual se realiza mediante avances sucesivos laterales y en profundidad, y que inicia a través de la etapa de perforación y posterior tronadura. Este método minero se caracteriza por generar un área de trabajo de grandes dimensiones, así como de requerir maquinarias de capacidades sobresalientes. Además, cabe destacar, que sin perforación no es posible generar movimiento mina por lo que se caracteriza por ser un paso de gran importancia para el proceso minero.

Por otra parte, la perforación de las mallas se distingue ya sea para mineral o para lastre, si bien es muy importante que la granulometría del material posteriormente tronado a cargar en los respectivos CAEX cumpla con los estándares de no generar mayores daños tanto a equipos de carguío como de transporte, la malla de mineral requiere que idealmente la granulometría sea menor que en el caso del lastre, para que se pueda procesar con éxito al momento de la reducción primaria. (*Mining & Construction, 2013*) [4]



Figura 1. Perforación de producción

2.2. Tecnología de perforación autónoma (ADS)

En la industria minera, los términos autónomo y automatizado se utilizan indistintamente. Sin embargo, y en el sentido más estricto de la palabra, un sistema autónomo no requiere ningún tipo de supervisión humana o entrada directa. En cambio, un sistema automatizado sí requiere de alguna forma de supervisión humana para que funcione. De estar bien diseñados, ambos sistemas, autónomo y automatizado, permitirán que el proceso sea más previsible, coherente y de mayor calidad. (Caterpillar, s. f.) [5].

En base a lo anterior, los diferentes niveles de implementación tecnológica se definen específicamente como:

- **Sistema Mecanizado:** Uso de máquinas operadas de forma total por los operadores.
- **Sistema Automatizado:** Reemplazo de trabajadores por máquinas (requieren supervisión humana).
- **Sistema Autónomo:** Independiente de supervisión humana.

2.2.1. Visión general del sistema autónomo de perforadoras (ADS)

El Autonomous Drilling System (ADS) es un sistema que permite operar equipos de perforación de manera automatizada, es decir, ingresar secuencias de perforación que, una vez se inicien, se pueden desarrollar de manera continua con la supervisión, pero sin la intervención directa de un tercero, de tal manera que su operación e interacción con el entorno esté controlada y autogestionada desde un lugar tan remoto como la infraestructura de red lo permita. En la Figura 2 se ilustra, de manera general, la arquitectura de la tecnología ADS. (Creación propia)

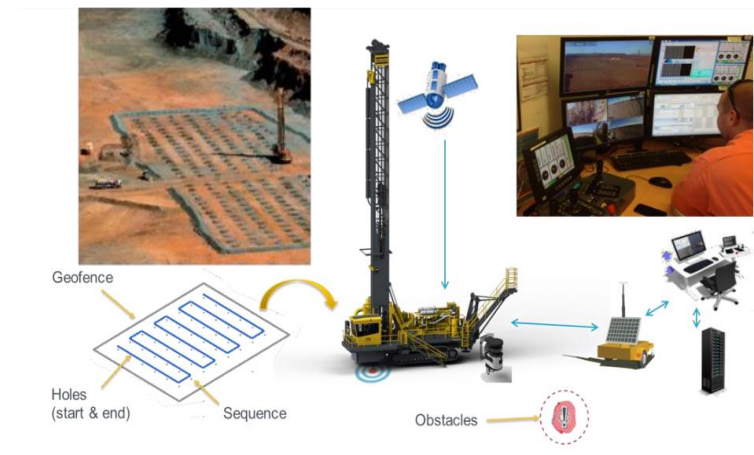


Figura 2. Lookup de la tecnología ADS.

La perforación autónoma facilita (*AngloAmerican Perú, 2022*) [6]:

- Ejecutar automáticamente el plan de perforación, reduciendo el trabajo topográfico mediante creación de ubicaciones a través de planes de perforación digitales.
- Identificar proximidad de personas y detectar obstáculos entregando así una operación más segura.
- Desplazarse y nivelarse de manera independiente según los requerimientos necesarios dentro del sector a perforar.
- Realizar la perforación de manera más precisa para evitar la perforación excesiva o insuficiente según sea el caso.

2.3. ADS en el mundo

La tecnología ADS, ha ido creciendo durante el último tiempo; comenzando a operar de forma tele remota hasta conseguir, actualmente, implementarse una operación completamente autónoma.

Respecto a los proveedores de la tecnología autónoma para perforadoras, en el mercado se identifica a Epiroc y Flanders como dos proveedores que destacan por su presencia a lo largo del tiempo en que se ha desarrollado e implementado la tecnología ADS; este último resultando en una conveniencia sobre todo para los casos en que se tiene una multiflota de perforadoras. Actualmente, ambos proveedores tienen cobertura en las principales regiones mineras del planeta, registrando un alto índice de confiabilidad para llevar a cabo este tipo de proyectos debido a su madurez tecnológica y su vasta experiencia. En la Figura 3 se refleja la cobertura mundial de ambos proveedores: (*Tellus Mining, 2022*) [7]



Figura 3. ADS en el mundo para Epiroc y Flanders.

Además de estos principales proveedores, también tienen avances en estas tecnologías empresas como Caterpillar y Sandvik.

2.4. Factores habilitantes para la tecnología ADS

Los factores habilitantes para que la tecnología de perforadoras autónomas pueda operar correctamente, se distinguen en:

2.4.1. Componentes

Para que un equipo de perforación funcione de forma autónoma, debe cumplir con ciertos elementos que en conjunto se complementan para que el proceso de perforación automatizado se lleve a cabo (*AngloAmerican Perú, 2022*) [6].

- Cámaras Zoom y estáticas.
- Antena GPS.
- Laser de detección de obstáculos.
- Luces indicadoras para modo de operación.
- Switch remoto / Manual.
- Sensores de velocidad.
- Redes eléctricas de automatización en cabina.
- Silla Op. Manual / Switch Remoto.
- Antena conectividad de red.

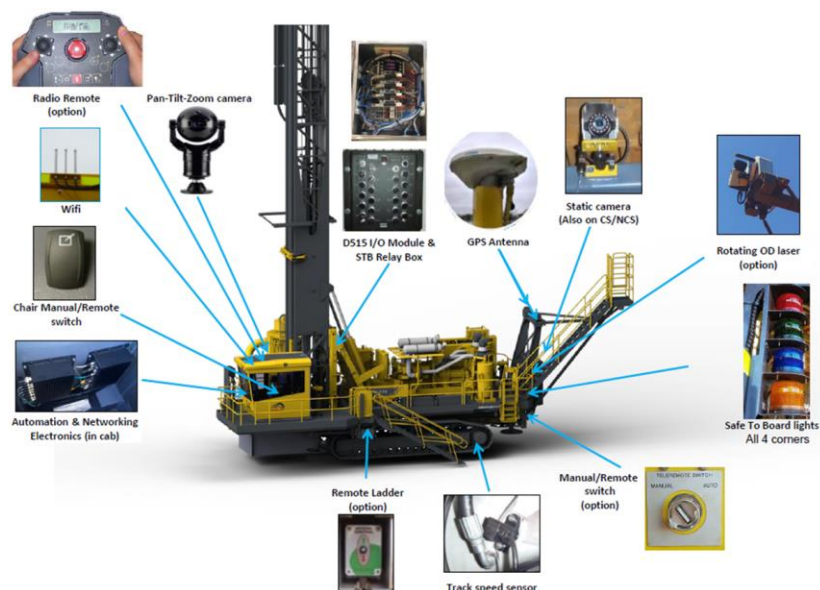


Figura 4. Elementos que componen el sistema de autonomía de perforadora.

2.4.2. Integración a la red de comunicaciones

Para optimizar su funcionamiento, la autonomía requiere un robusto sistema de comunicaciones que permita un óptimo nivel de conectividad con la central de despacho. El beneficio de una buena conectividad es la capacidad para soportar un mayor número de dispositivos conectados a la red, pudiendo operar camiones y perforadoras autónomas con diferentes redes de comunicación, al mismo tiempo sin interferencias o caídas, ayudando en el control de los procesos a través de los sistemas autónomos digitalizados que funcionan en tiempo real.

Los beneficios de una buena conectividad, es la capacidad de un mayor número de dispositivos conectados a la red, en este caso pudiendo operar camiones y perforadoras autónomas al mismo tiempo sin interferencias de red o caídas, ayudando en el control de los procesos a través de los sistemas autónomos digitalizados que funcionan en tiempo real, optimizando su funcionamiento.

Una conectividad de red robusta permite manipular efectivamente los dispositivos a distancia y ayudando con la exactitud en la ubicación geográfica de dispositivos con un margen menor a un metro. También permite un mayor desempeño para los equipos de perforación para que sean controlados simultáneamente, transfiriendo más datos al mismo tiempo.

En los proyectos de autonomía, considerando la importancia y relevancia de la red de comunicaciones, se debe tener una holgura de tiempo previa al comienzo del comisionamiento de los equipos con esta instalada, de modo de verificar coberturas, rangos, requerimientos y sectores donde estas serán instaladas para cumplir con las exigencias de la mina correspondiente. La ausencia o atrasos asociados a la red, generará atrasos a todo el proyecto en general, ya que sin red de comunicaciones ningún sistema autónomo puede funcionar. (Tellus Mining, 2022) [7], (Radwin. 2022) [8]

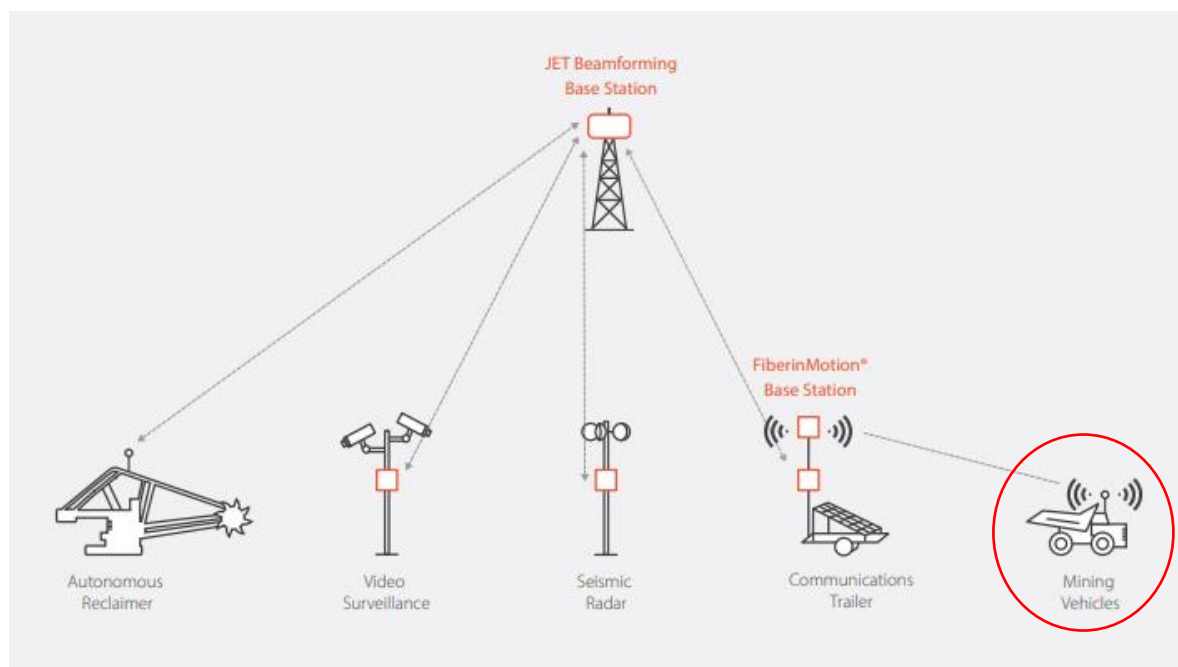


Figura 5. Diagrama conceptual de redes de comunicación.

2.4.3. Posicionamiento satelital

Los sistemas convencionales de posicionamiento tienen una precisión de $\pm 5\text{m}$, el cual se encuentra lejos de ser aceptable para la autonomía. Por esta razón, para el caso autónomo se provee asistencia desde estaciones base ya sea mediante correcciones de ethernet o de radio. Se utiliza una solución cinemática en tiempo real (RTK) cuando se dispone de suficiente calidad de señal, la cual es necesaria para el funcionamiento autónomo. El sistema puede utilizar cualquier constelación de satélites (normalmente GPS y GLONASS) para una solución GNSS. La precisión proporcionada por el sistema depende de la configuración del sitio (por ejemplo, GPS visible / altura del banco, modelo de estación base). La solución RTK requiere una precisión de señal GNSS que nominalmente se requiere que sea de $\pm 30\text{ mm}$. La precisión resultante para el sistema HNS es típicamente $\pm 120\text{ mm}$ para precisión de posición (X/Y) y $\pm 240\text{ mm}$ para precisión de elevación (Z).

El sistema HNS consta de dos antenas GNSS y hasta dos receptores GNSS y los soportes asociados y el cableado necesarios. Si se van a recibir correcciones de radio, se requerirán antenas de radio. Si se recibirán correcciones Wifi /4G, se requerirá el hardware de red en la perforadora (Tellus Mining, 2022) [7].

El sistema proporciona la ubicación exacta de los barrenos, además de sus respectivos ángulos y profundidades. Las perforadoras convencionales no necesariamente utilizan alta precisión para la perforación. Y esta, es importante tanto para mejorar la calidad de la perforación en términos geométricos, como en el direccionamiento de la perforadora dentro del sistema autónomo. De esa manera, los operadores de las perforadoras deberán gestionar el cambio asociado al trabajo desde una baja a una alta precisión con la autonomía, facilitado por esta misma.

Un esquema de perforación más uniforme dará como resultado una tronadura de mayor calidad, que proporcionará una mejor fragmentación y minimizará la necesidad de tronaduras secundarias.

2.4.4. Personal requerido para implementar ADS

El proveedor propone un requerimiento de personal experto para el proyecto de implementación, al menos de manera temporal, para luego reducir el equipo al mínimo. De esta manera, se presentan ciertos roles que han de estar presentes desde antes de la llegada de los kits autónomos, otros una vez recepcionado el primer equipo, algunos solo durante el periodo de ramp up, etc. Ante esto, se identifican los siguientes roles (Tellus Mining, 2022) [7]:

- I. **Project Leader:** Es el profesional a cargo de la integración en la etapa de ingeniería entre el vendedor y el cliente. Posterior a eso, es el responsable de la correcta implementación de la tecnología en el sitio y de la adaptación funcional y desempeño propuesto por el vendedor. El Project leader debe estar presente a lo largo de todo el proyecto.
- II. **Champion Project:** Es el profesional a cargo de sistemas autónomos a cargo de las fases de puesta en marcha y Ramp-Up, deben estar presentes antes de la llegada del kit autónomo y equipo a faena.
- III. **Ingeniero implementación:** Profesional especializado en el funcionamiento de la solución en términos de interacciones de los aplicativos, protocolos y configuraciones a nivel de Software y Hardware, con canal directo con fábrica. Es el encargado junto con el Champion de realizar el comisionamiento de los equipos.

2.4.5. Personal de soporte para ADS

El soporte del proyecto viene de la mano de estos roles, los cuales tienen un involucramiento diferente al personal de proyecto propiamente tal.

- I. **Automation Product Specialist (APS):** Es el profesional especializado en el producto, que está preparado para poder asesorar, guiar y resolver la cotidianidad de la operación autónoma.
- II. **Operation and Technology Support (O&T):** Profesional con conocimientos específicos en el uso y operación de la solución tecnológica, brinda apoyo cotidiano al operador / controlador.
- III. **Soporte remoto:** Corresponde a un soporte de la solución entregado a distancia, a través de la modalidad “Back office”

2.4.6. Personal de operación de ADS

Una vez la operación se encuentre en régimen las perforadoras se encontrarán a cargo de cierto personal que se asegure de que el proceso en sí se esté desarrollando sin problemas en pos de cumplir su objetivo, que es adherirse a la planificación previamente asignada. Por esta razón, para operar la autonomía, es necesario incorporar dos nuevos roles a la operación:

- I. **Controlador ADS:** El controlador ADS es quien está a cargo de operar el sistema para las perforadoras autónomas, se encuentra en el área previamente designada para la supervisión de que las labores se realicen de manera correcta, además de asignar las respectivas tareas a los equipos que se encuentren en operación para apegarse al plan minero.
- II. **Operador en terreno ADS:** En este caso, el operador en terreno es quien tal como su nombre indica se encontrará in situ desarrollando labores de soporte, además de verificar que se encuentren las condiciones correctas en los patios de perforación para que las perforadoras autónomas realicen sus tareas asignadas.

2.4.7. Capacitaciones

Se imparten diversos cursos para el personal que llevará a cabo la operación de la perforación, además de quienes tendrán interacción directa e indirecta, acorde a la gestión del conocimiento que debe implementarse para que la tecnología alcance su óptimo desempeño. Los tipos de capacitaciones se enfocan a diferentes tópicos, entre los que se encuentran:

- I. **Introducción al sistema autónomo:** Busca entregar los conocimientos necesarios para entender los sistemas tecnológicos y autónomos en equipos de perforación autónomos.
- II. **Mantenimiento de sistemas tecnológicos aplicado a equipos de perforación:** La idea es capacitar al personal técnico, encargado del mantenimiento y reparación de los equipos de perforación, en técnicas adecuadas para mantener y reparar los componentes electrónicos y de comunicación asociados a la operación autónoma.
- III. **Operación de sistema autónomo aplicado a equipos de perforación:** El propósito es entregar los conocimientos necesarios para entender, aplicar y operar los sistemas tecnológicos y autónomos en equipos de perforación.
- IV. **Entrenamiento a la plataforma de operación:** Entregar los conocimientos necesarios para entender, aplicar y operar sistemas tecnológicos asociados a la plataforma de operación autónoma.

Cabe destacar que la autonomía, a pesar de exigir nuevas competencias a los respectivos operadores que manipulan la tecnología, por ningún motivo reemplazará las competencias de un operador de perforadora, por lo que es recomendable convertir tales roles para interactuar directamente con las perforadoras autónomas.

2.4.8. Infraestructura de operación

Desde una **sala de control** se proporciona de equipos y softwares necesarios para las operaciones remotas y / o el monitoreo de la flota autónoma. En esta, se incluye un rack de red de equipos de automatización junto con la(s) estación(es) Teleremote y el software de monitoreo. El sistema es escalable en función del número de equipos y estaciones Teleremote.

- a) **Oficina Teleremote (OPS):** Contiene todo lo que un operador remoto necesita para monitorear y controlar una flota de perforadoras autónomas. Consiste en un rack para tecnología escalable, la estación del operador y un software avanzado para entregar información de la situación completa. Como se muestra en la Figura 6 se cuenta con

monitores, computadoras portátiles, radio bidireccional, y video en el pozo. (*Reporte Minero, 2020*) [9].



Figura 6. Ejemplo de oficina Teleremote.

- b) **Rack Onsite (Half Rack):** El Rack onsite alberga el servidor de máquina común de automatización, los módulos decodificadores de video, sistema de seguridad, enrutador, SAI y el inversor de corriente. Este Rack de equipos de automatización actúa como un eje central para el control y monitoreo del centro de operaciones de la flota autónoma de perforadoras. Se puede escalar hasta 3 (tres) estaciones Teleremote y nueve perforadoras conectadas.
- c) **Estación Teleremote:** La estación Teleremote permite al operador remoto controlar directamente la perforadora. Los controles y la interfaz de usuario de esta estación están configurados de la misma manera que los de una perforadora, lo que garantiza facilidad de uso. Cada estación Teleremote se comunica con el módulo decodificador, esto permite al operador ver y controlar la alimentación de la cámara desde la perforadora asignada, por lo que se requiere uno por perforadora. Utilizando el panel del operador y el joystick, el operador puede:
- Controlar cualquier función de perforación.
 - Seleccionar las alimentaciones y controlar las cámaras.
 - Utilizar el limpiaparabrisas de la cámara en caso de que sea necesario limpiar la lente.

2.4.9. Repuestos críticos de operación

Los repuestos críticos tienen como objetivo solventar la operación para posibles fallas del sistema, ya sea de infancia o resultantes de la operación. Por lo general esto se propone de la experiencia obtenida en diferentes operaciones que el proveedor ha tenido, sin embargo, no necesariamente representa el consumo particular del cliente. No obstante, genera el espacio de tiempo que permite ir creando historial de consumo para las definiciones de inventario particulares para cada sitio. Además, por lo general las cantidades de stock se sugieren por grupos de 3 perforadoras, si esta cantidad aumenta, se considera un proporcional.

2.5. Sistemas de seguridad en autonomía

La perforación autónoma, por operar prácticamente sin presencia humana, se le debe proveer al sistema elementos adicionales relacionados con la seguridad del equipo y de quienes puedan operar de forma conjunta a él. Además, el sistema debe estar preparado y provisto de una inteligencia artificial que le permita tomar decisiones y ejecutar acciones seguras con su entorno.

Ante esto, los proveedores proveen de ciertos sistemas que permiten operar de manera segura la perforación autónoma, los cuales se enlistan a continuación:

2.5.1. Safe to Board (STB)

El sistema STB entrega medidas de seguridad visibles y audibles para las partes interesadas que deben interactuar con una perforadora. Este se controla mediante una combinación de conmutador remoto / manual y estados activados por software. Se utilizan semáforos de luz y alertas audibles para notificar al personal cercano sobre el modo de automatización actual en el que se encuentra el equipo, así como un retardo de control configurable. Esta función se alimenta con un interruptor de llave, y los semáforos están en ubicaciones específicas para permitir una visualización 360° por parte del personal que pueda necesitar acercarse o interactuar con la perforadora.

- I. **Semáforos de luz:** El hardware funciona de modo que se colocan cuatro semáforos de luz alrededor del equipo, uno en cada esquina. Cada semáforo de luz contiene cuatro luces; rojo, verde, azul y ámbar. Estos colores se seleccionaron debido a que son comunes con los equipos de minería automatizados existentes. (*Tellus Mining, 2022*) [7]



Figura 7. Semáforos de luz en perforadora autónoma.

	Todos apagados Personal autorizado puede abordar el equipo	
	Todas parpadeando – Modo de transición Es seguro acercarse/apartarse de la perforadora con comunicación previa	
	Luz roja parpadeando – E-Stop Activado Parada de emergencia activada, requiere contactar al Controlador de perforadoras	
	Luz verde parpadeando – Modo manual Perforadora operada por personal en sitio	
	Luz azul parpadeando – E-Stop Activado Perforadora operada autónomamente	

Figura 8. Interpretación semáforos de luz en perforadora autónoma.

- II. **Interruptor manual / remoto:** El interruptor permite al operador o al personal de mantenimiento cambiar físicamente la perforadora de remoto a manual y viceversa, según sea necesario. Antes de seleccionar el control remoto, los sistemas de seguridad entre la perforadora y la oficina deben estar sincronizados. Los LED en la caja de seguridad brindan conciencia visual para este paso. Si el enlace de seguridad se ve comprometido, la perforadora se detendrá de emergencia y se alertará al control remoto.

2.5.2. Sistema de parada de emergencia

El sistema de parada de emergencia mejorado ha sido diseñado para cumplir con los requisitos de seguridad funcional, de modo que se pueden monitorear las condiciones de parada de emergencia, la que se puede activar de las siguientes maneras:

- El botón de parada de emergencia se activa a bordo de la perforadora
- La temperatura de descarga de la unidad compresora supera la temperatura máxima de funcionamiento
- Hay una falla de comunicación significativa entre el maestro de seguridad (ubicado en rack del sitio) y el “esclavo de seguridad” (ubicado en la perforadora).
- Se activa la parada de emergencia desde la sala de control.

2.5.3. Detección de obstáculos

El sistema de detección de obstáculos utiliza una combinación de láseres verticales y horizontales para identificar y clasificar objetos alrededor de la perforadora. El sistema calcula y monitorea una zona dinámica proyectada en la dirección del movimiento de la máquina. Se comunica con el control informático de la perforadora para detener el movimiento e inhibir las operaciones de propulsión cuando se detecta un obstáculo correctamente clasificado dentro de la zona de parada. Los láseres están distribuidos en la perforadora para permitir una cobertura de 360° horizontalmente y una cobertura vertical en el extremo de la cabina. En la Figura 9 se aprecian las ubicaciones de los láseres para una PV271. (Tellus Mining, 2022) [7]

Este sistema identifica y clasifica varios tipos de objetos, tales como:

- Polvo
- Objetos sólidos
- Bermas / hileras
- Pendientes
- Desniveles abruptos
- Brechas

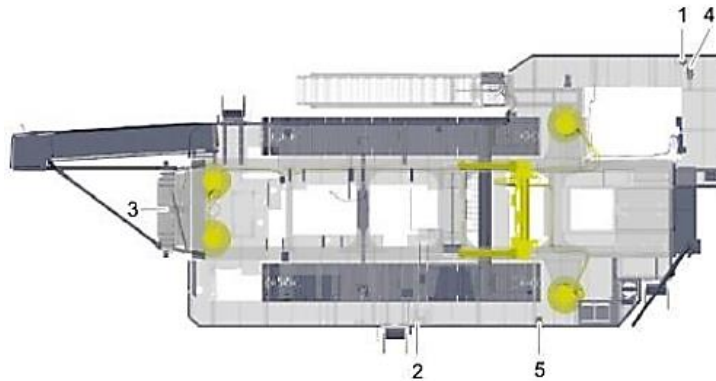


Figura 9. Ubicación de los láseres para una PV271.

La perforadora proyectará una zona de parada en la dirección de su recorrido, si un obstáculo se cruza en la zona proyectada, esta se detendrá. Respecto a la proximidad, se proporciona un control adicional de la distancia entre la máquina y las bermas de seguridad. Cuando la perforadora se acerca a otra que se encuentra dentro de una geocerca (es el límite virtual del patrón de perforación / área de trabajo, si la máquina se cruza con esta, la activación de propulsión se desactiva de inmediato), pero tiene una berna de seguridad detrás, es posible que el sistema informático cambie de vista y el operador pueda controlar la distancia y la

altura de la ubicación de la máquina y la bermas de seguridad. Así se reduce el número de interacciones requeridas por el operador (*Epiroc, 2016*) [10].

2.6. Funcionamiento del sistema ADS

Para operar en forma autónoma, se debe preparar un área de acuerdo con los requisitos del banco y se debe registrar de manera excluyente el límite de la malla de perforación, y el plan de perforación, los cuales se importan a la plataforma de la perforadora, donde el operador crea una secuencia autónoma para ejecutar, de lo contrario, la perforadora no entrará en funcionamiento, a diferencia del caso manual, el cual no requiere necesariamente de un plan formalizado para ejecutar la operación. Luego, los datos se compilan en un plan de perforación y son exportados a la perforación en sí. Luego, el operador se conecta al equipo a través de la estación del operador, carga el plan de perforación en iniciar la ejecución automática del plan de perforación. Tras esto, el equipo ejecuta su labor y envía información al operador y los servidores a través de la red de la mina.

Un tema importante en el proceso de perforación es la obtención de datos en el momento que se realiza la perforación, con variados parámetros de importancia, los cuales pasan por el sistema de control, proporcionando a los operadores mineros la capacidad de recolectar la data de la condición y de la producción de la perforadora, manteniendo los controles existentes en su lugar. Los datos recolectados pueden usarse entonces para hacer cambios en la planificación minera y en el proceso de mejoramiento de fragmentación antes de cargar los pozos (*Epiroc, 2016*) [10].

2.6.1. Automatización

En la operación tradicional y la teleoperación, el operador manipula la máquina manualmente a cada ubicación de los pozos. Luego, el operador simplemente presiona un botón en la interfaz del operador que inicia el ciclo de perforación, que incluye nivelación, colocación de collarines, perforación y retracción de la broca.

En el caso de la autonomía, a diferencia de la operación tradicional y la teleoperada, la máquina puede **avanzar al lugar del pozo siguiente** contando con la capacidad de **auto desplazamiento** entre estos, donde luego reinicia el proceso para continuar repetitivamente hasta abordar la totalidad de la malla de perforación ingresada.

Los enfoques tradicionales para extraer material de la roca casi siempre han implicado perforar agujeros en la roca, llenar con algún tipo de explosivo y volar el piso para fracturarlo lo suficiente como para permitir la operación de la pala. Esto no siempre produce el resultado deseado.

La colocación irregular de pozos puede causar una fragmentación deficiente que resulta en una extracción difícil para el equipo de carga. Las profundidades inexactas pueden dar lugar a bancos irregulares.

2.6.2. Nivelación automática

La perforadora es capaz de nivelarse y desnivelarse automáticamente dentro de una precisión definida, se hace utilizando un inclinómetro para medir la orientación de la perforadora y un interruptor de inclinación adicional para garantizar que no exceda los límites de estabilidad de la máquina. Si se exceden límites preestablecidos, se puede anular y nivelar automáticamente la máquina. Esta funcionalidad es de gran importancia y destaca debido a que permite generar perforaciones más precisas que el caso convencional tal como se grafica en la Figura 10 (Sandvik, 2021) [11].

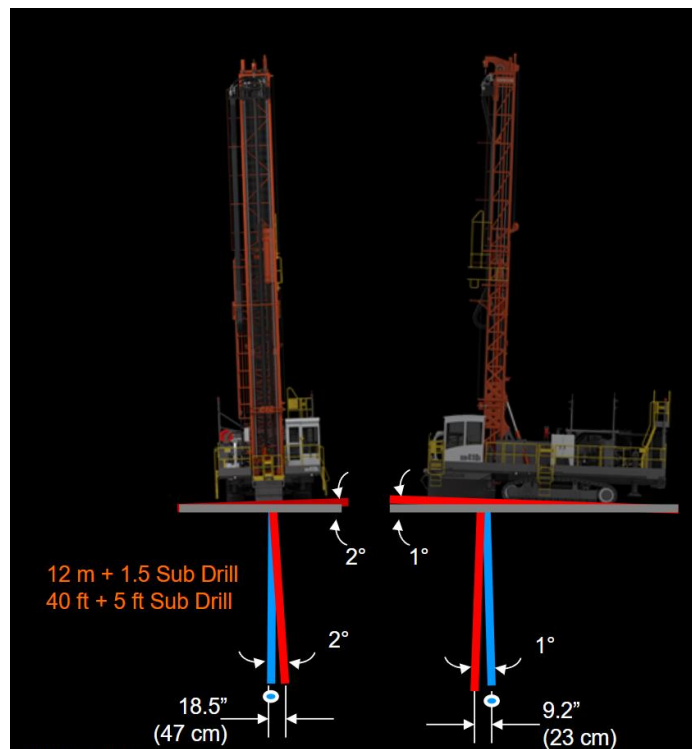


Figura 10. Nivelación automática en perforadora autónoma.

2.6.3. Autodrill

Es la tecnología de perforación adaptativa inteligente que optimiza continuamente el contacto con el suelo para ofrecer el resultado de perforación deseado. La perforación se controla de forma adaptativa para evitar la abrasión y la penetración excesiva para proporcionar profundidad de corte ideal y garantizar alta tasa de penetración. Se tiene control de aire y

agua de circuito cerrado para asegurar un correcto flujo agua/aire que da como resultado pozos de alta calidad. Dependiendo del tipo de broca a usar, se garantizará que los parámetros de perforación coincidan con las capacidades de la broca, de modo que se maximice la vida útil de los consumibles.

Inicialmente, se detecta el suelo al monitorear un alza de presión, luego comienza una rutina de ajuste de collarines. El sistema determina de manera automática la profundidad óptima del collar antes de continuar con la perforación. El torque, la presión del aire y la vibración se monitorean para detectar condiciones de atasco a las que el sistema responde de manera adaptativa. Cuando se alcanza la profundidad deseada, se limpia el pozo (si es necesario) y la broca se retrae a una posición segura para el traslado al pozo siguiente, ciclo que se representa en la Figura 11. (Tellus Mining, 2022) [7]

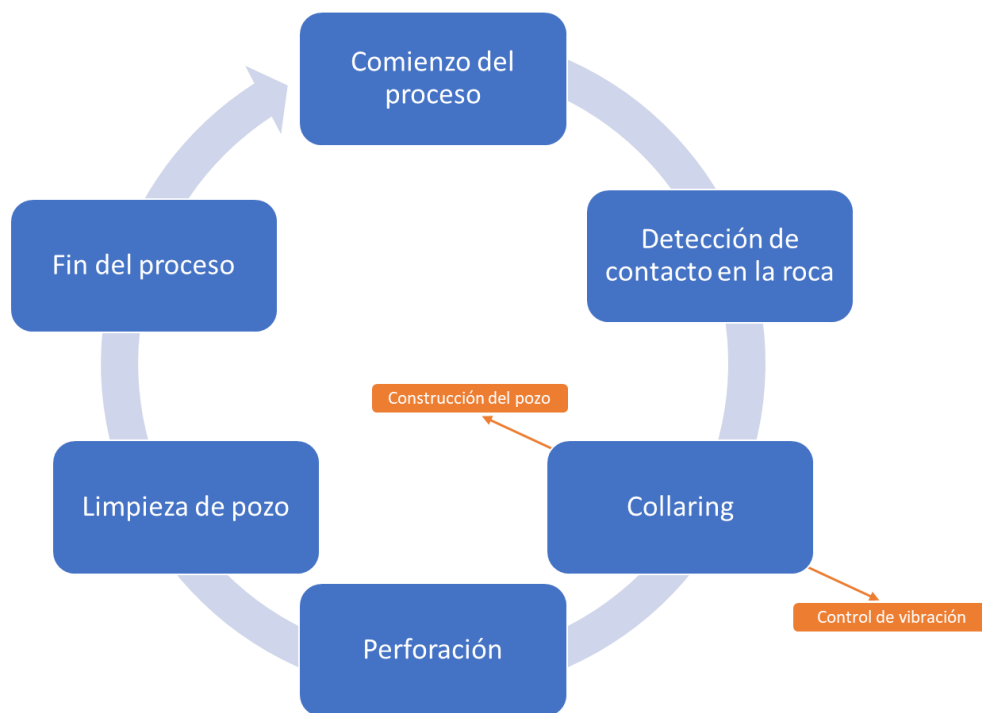


Figura 11. Ciclo de sistema AutoDrill.

2.6.4. Cambio automático de broca

Las brocas de perforación son automáticamente cambiadas en la perforadora, a través de un comando de inicio manual o de forma autónoma basado en las condiciones del terreno y algoritmos que evalúan y determinan el deterioro de la broca, levantando así la necesidad del cambio.

2.6.5. Puntos de paso auto generados

El sistema es capaz de determinar y/o sugerir al operador del centro de comando la mejor ruta de traslación del equipo en pos de optimizar tal etapa del proceso.

2.6.6. Salud de la perforadora

Se incluye un monitoreo predictivo de condiciones de los subsistemas de la perforadora y sus componentes relacionados para notificar proactivamente cuando se requieran acciones correctivas, además de indicar específicamente qué componentes requerirían el reemplazo.

2.6.7. Seguimiento automatizado de consumibles

Identificación automática de los consumibles de la perforadora, tales como brocas, barrenos, acoples y absorbedores de impacto, para así registrar sus horas de operación, ubicación, fechas, data operacional (pulldown, RPM, etc.)

2.6.8. Ajuste de parámetros de perforación en base a dureza del terreno

Comportamiento de la perforación autónoma se selecciona automáticamente por el sistema de control para una condición de terreno según corresponda (duro/medio/blando)

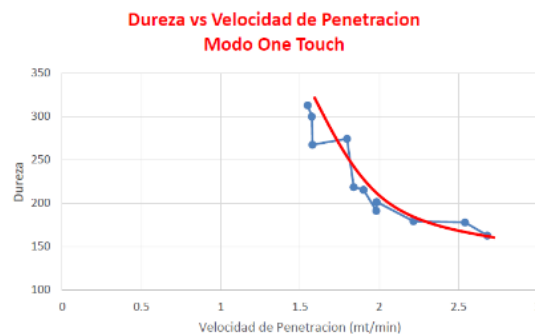


Figura 12. Relación dureza del terreno vs velocidad de penetración de perforadora.

2.6.9. Ciclo completo perforación autónoma

Así, en resumen, el ciclo completo asociado a la perforadora autónoma consta de 6 grandes pasos que engloban cada una de las acciones que se han levantado anteriormente.

- En primer lugar, la posibilidad de navegación entre los pozos previamente asignados a través de la malla de perforación subida al sistema
- Posteriormente el ajuste y posicionamiento automático según los requerimientos impuestos.
- Ajuste de collarines para asegurar la correcta perforación del pozo en términos de precisión
- La respectiva perforación realizada de manera automática
- Finalización del pozo con profundidad previamente asignada
- Por último, y una de las acciones que distingue principalmente a la perforación manual de la autónoma, corresponde al “tramming” o traslado de la perforadora entre pozos, el cual se realiza en pos de optimizar los tiempos asociados al ciclo de esta misma.

Permitiendo así, continuar con el siguiente pozo, y repitiendo el ciclo hasta que todos los pozos previamente seteados en la malla de perforación son completados, como se observa en la Figura 13. (*Revista Tecnología Minera*, 2021) [12]



Figura 13. Ciclo de perforadora autónoma

2.7. Modelo de uso de tiempos

Una manera efectiva de monitorear el desempeño de las flotas ya sea en modalidad manual o autónoma, para equipos de transporte, perforación, carguío o auxiliares, radica en el monitoreo del uso del tiempo, el cual expone cuán productivo es un equipo asociado a sus funciones, y deja en claro cuáles son las razones que entregan oportunidad de mejora para que el uso de estos sea más aprovechado en general. De esta manera, el modelo de uso de tiempos, nombrado en ciertas faenas como “ASARCO”, se expone gráficamente en la Figura 12: (Tellus Mining, 2022) [7]

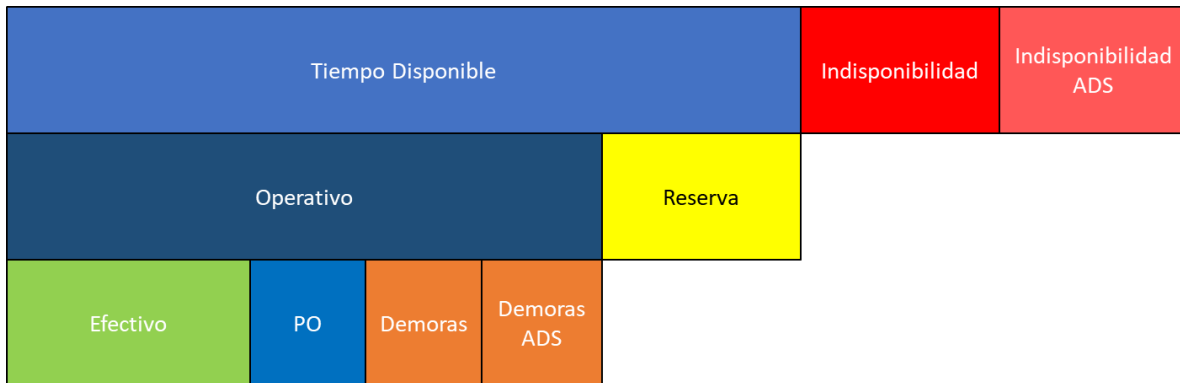


Figura 14. Modelo de uso de tiempos ASARCO.

A continuación, se detallan las características de cada tiempo:

- **Tiempo nominal:** Tiempo durante el cual el equipo se encuentra presente en la faena. Es el tiempo total del periodo, en un día serían 24 horas.
- **Tiempo disponible:** Corresponde al tiempo en el que el equipo está habilitado y en correctas condiciones para operar. De este se restan los mantenimientos tanto programados como no programados, por lo que el equipo esta cantidad de tiempo está listo para ser operado.
- **Indisponibilidad:** Este periodo se asocia a los tiempos destinados a mantenciones programadas y/o no programadas, es decir, las que se puedan presentar en terreno.
- **Indisponibilidad ADS:** Este periodo se asocia a los tiempos destinados a mantenciones programadas y/o no programadas asociadas directamente a la tecnología autónoma.
- **Tiempo operativo:** Es el tiempo en que el equipo está operando en faena, es decir, está con operador.
- **Reservas:** Es el tiempo donde el equipo estando en condiciones mecánicas de operación, no es utilizado en labores productivas, ya sea por falta de operador o superávit de equipo en ese momento.

- **Tiempo efectivo:** Se asocia al tiempo en que el equipo está siendo utilizado para lo que ha sido adquirido, es decir, realiza labores puras de producción sin retrasos.
- **Demoras programadas:** Son tiempos donde el equipo de antemano tiene programado detenerse, ya sea cambios de turno u horarios de colación.
- **Demoras no programadas:** Tiempos de detenciones no programadas, estas no tienen un tiempo predeterminado, ya que pueden ser tales como detenciones por somnolencia, eventos geotécnicos, polución, etc.
- **Demoras ADS:** Son tiempos de detenciones (programadas o no programadas) que se asocian directamente a fallas o interrupciones que pueda sufrir la tecnología por sus propias capacidades de interacción con el entorno.
- **Pérdidas operacionales:** Es el tiempo en que el equipo se encuentra esperando (posibles colas).

2.8. Estándares perforación autónoma

Respecto a los estándares operacionales requeridos para que la promesa de valor de la autonomía de perforadoras se cumpla, es que se exigen condiciones necesarias mínimas expuestas a continuación:

2.8.1. Requerimientos para el comisionamiento

Hay ciertos requerimientos para el comisionamiento, de modo de poder comenzar a implementar la tecnología de manera exitosa:

- Espacio de 150 x 100 metros mínimo, donde sea posible realizar perforaciones, libre de otros equipos y segregado.
- Sala de operación habilitada, para el monitoreo a tiempo real.
- Asistencia de un operador y supervisor.
- Un espacio con acceso a una caja de banco.
- Bermas de 60 a 70 cms. de alto.
- Pendiente del patio que se encuentren entre $\pm 8^\circ$.
- La disposición de una malla de perforación con geocerca.
- Que la perforadora no presente fallas activas.

2.8.2. Requerimientos para preparación del patio

Por otro lado, para la preparación del patio existen también ciertos requerimientos mínimos cuando la perforación autónoma entre en régimen:

- **Bermas de seguridad:** Esta se utiliza para delinear, la altura debe encontrarse en el rango $> 0,5 \text{ m}$ y $\leq 0,8 \text{ m}$ con el fin de que funcione la detección de orificios de la fila frontal. En este caso es recomendado que se cree una berma de seguridad alrededor de la geocerca donde operará la perforadora autónoma. (CNN Chile, 2021) [13]



Figura 15. Ejemplo de diseño berma de seguridad

- **Suelos Blandos:** El suelo blando puede hacer que las huellas de las perforadoras se atasquen o produzcan una mala capacidad de giro que impida la operación autónoma. Se recomienda despejar el terreno blando antes de comenzar las operaciones de perforación autónoma.
- **Área de estacionamientos:** Se debe delinear un área designada para estacionamiento. Así para que el personal que entre a una zona de trabajo autónomo quede delimitado con una berma o hilera de seguridad.

- **Acceso a patios:** Los puntos de acceso al patio deben estar claramente identificados para todo el personal en el área. Aquí es recomendado instalar señalización en todos los puntos de acceso al banco que indiquen:
 - Configurar el indicador de modo de automatización
 - Contacto de operaciones autónomas de perforación
 - Obtener permiso de autorización antes de:
 - i) Entrar al área de trabajo autónomo
 - ii) Acercarse o subir a una máquina
 - iii) Salir del banco

- **Límites de inclinación:** Cumplir con las angulaciones máximas permitidas por el equipo, tanto en Pitch, Roll en condiciones de traslado y perforadora nivelada.

- **Diseño de la malla:** El diseño del patrón de perforación se ve afectado por el tamaño de la máquina y los límites operativos, los siguientes elementos deben tenerse en cuenta para el diseño del patrón:
 - Espaciado y carga
 - Pozos previos a berma
 - Muros altos (caja)
 - Espaciado de la geocerca al final de la fila o para permitir que la máquina complete la transición de fila a fila

- **Tamaño de la malla:** El plano de perforación enviado a las perforadoras autónomas, no debe exceder los 2000 pozos perforados. Un patrón de perforación más grande se puede dividir en áreas de trabajo para perforaciones.

- **Profundidad de pozos:** No deben exceder la profundidad límite de diseño del equipo. En el caso de la PV271 32 metros de profundidad máxima de barreno, mientras que la PV351 cuenta con 41,1 metros de profundidad máxima de barreno.

- **Geocerca:** La geocerca (Figura 16) es el límite del patrón de perforación / área de trabajo, si la máquina se cruza con la geocerca, la activación de propulsión se desactiva de inmediato. Esta es imprescindible para operar ya que demarca el área en la cual el equipo de perforación realizará su labor asignada. Esta debe ser cargada, al igual que el plan de secuenciamento de la perforación, en el sistema de operación autónoma, de manera de gestionar correctamente el área que se asigna en terreno para que el ciclo de perforación resulte exitoso sin mayores demoras.
- El área de trabajo debe ser inspeccionada manualmente para crear una geocerca precisa.
- Debe contener <250 puntos.
- Si la geocerca está fuera de la berma, es posible que no se pueda acceder a los pozos más cercanos a ella. (Gleeson, 2023) [14]



Figura 16. Geocerca en proceso de perforación autónoma.

- **Espaciado y carga:** Es la distancia lateral entre los pozos en una fila. Por ejemplo, el mínimo espaciado requerido para la PV351 es de 6,15 metros.

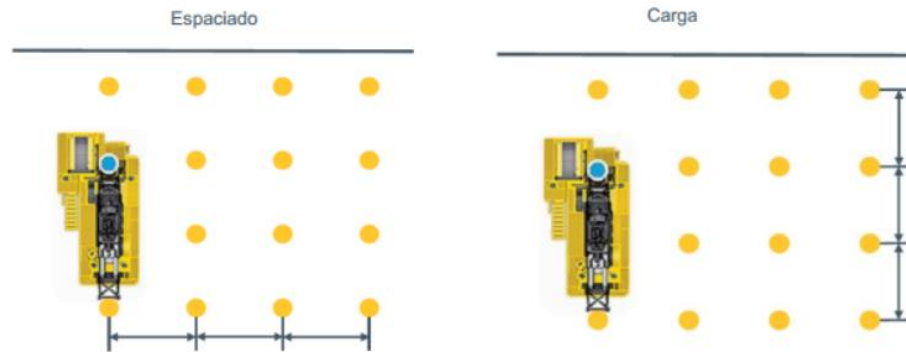


Figura 17. Gráfica de espaciado y carga entre pozos en una fila.

- **Pozos previos a la berma:** Siempre que el gato sea el punto de colisión más bajo de la máquina, y la berma de seguridad se haya construido como se recomienda, la máquina Pit Viper tiene la capacidad de propulsar hacia la berma hasta que se cruza o se alcanza el punto de colisión. A continuación, se muestra el espaciado mínimo para el pozo desde la berma: 1 metro.

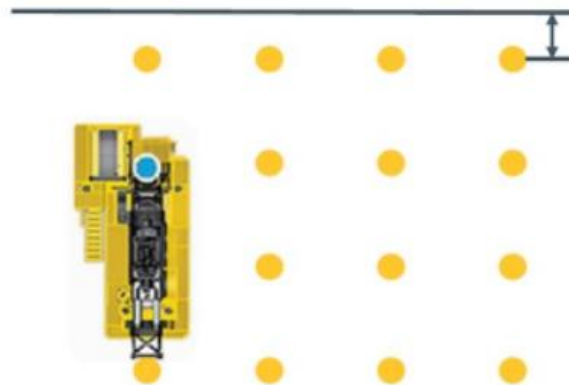


Figura 18. Espacio mínimo para pozos desde berma

- **Espaciado entre máquinas:** Se requiere un espacio mínimo entre máquinas para minimizar el potencial de interacción. El diámetro se toma desde el punto de pivote central de la máquina.



Figura 19. Diagrama de espaciado entre equipos.

A modo de ejemplo, en la Tabla 1 se presentan los espaciamientos mínimos que requiere la tecnología para operar entre los equipos Pit Viper 271 y 351 respectivamente:

Tabla 1. Espaciamiento mínimo entre equipos según modelo de perforadora.

Perforadora	Torre Vertical	Torre Angulada
PV 271	15,5 metros	18,0 metros
PV 351	21,0 metros	22,0 metros

3. Metodología y desarrollo del estudio

3.1. Metodología

Respecto a los puntos por abordar para una correcta implementación de la tecnología autónoma, es necesario seguir una ruta en la cual sea posible identificar e intervenir cada uno de los puntos críticos para verificar si una compañía minera cuenta con los requerimientos mínimos para que implementar la tecnología autónoma sea visto como una opción a estudiar. De tal manera, si bien ciertas tareas se pueden realizar de manera paralela, gráficamente se expone en la Figura 20, la metodología tomada para el presente estudio, el cual permite demostrar el ejercicio que implica incorporar una nueva tecnología que cambia la manera de operar como se hace hoy en día en la mayoría de las faenas mineras.

A grandes rasgos, se realiza un levantamiento de estándares mínimos que exige la tecnología para funcionar, un catastro de los KPI asociados a un caso manual el cual se verá modificado por incorporar la autonomía, de esto, nacerá un nuevo requerimiento de flota por cada uno de los escenarios estudiados, con sus respectivos levantamientos de costos, VAN, y los ahorros y costos que involucra la autonomía en cada uno de tales casos, viendo así cual sería el escenario más conveniente para una faena minera en operación.

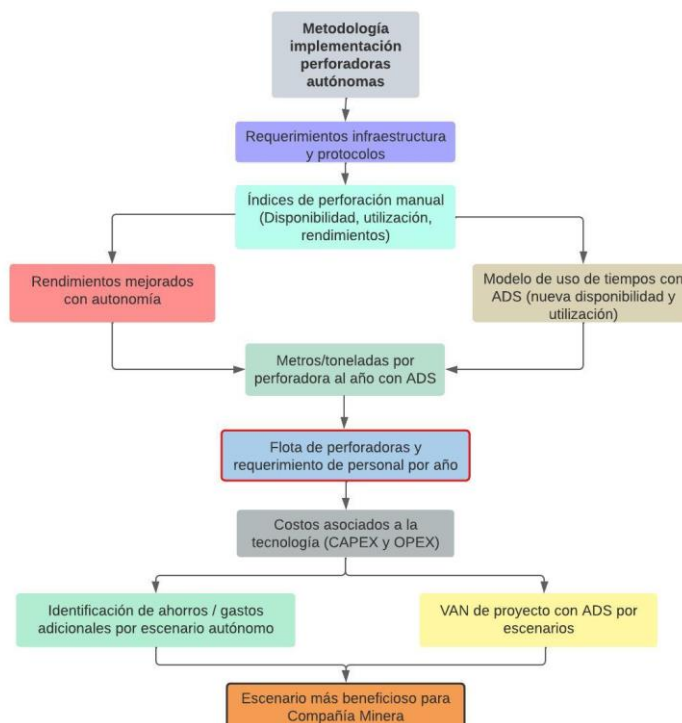


Figura 20. Flujo de metodología para implementación de perforadoras autónomas.

3.2. Escenarios a evaluar

Los escenarios por evaluar en el ejercicio se dan principalmente por parte de la flota manual, con equipos PV271, mientras que con la tecnología ADS se proponen dos escenarios: equipos PV271 autónomos y PV351 en la misma modalidad, siendo estos últimos de mayores dimensiones y capacidad de perforación. Se decidió realizar en primer lugar, la comparación directa del equipo PV271 en su modalidad manual y autónoma respectivamente, mientras que, por otro lado, también se incorporó al ejercicio la perforadora PV351, del mismo fabricante, pero con mejores capacidades de perforación respecto al otro escenario en términos de performance.

Así, las características técnicas de desempeño de los equipos evaluados y sus respectivas diferencias se observan en la Figura 21.

Proveedor	EPIROC	
Modelo	PV 271	PV 351
Pulldown (kN)	Hasta 311	Hasta 556
Speed Rotation (RPM)	0 - 150	0 - 170
Diámetro perforación (mm)	171 - 270	270 - 406
Largo perforación (m) – <i>Single pass</i>	16,8	19,8
Máxima profundidad de perforación (m)	32	41.1

Figura 21. Características de desempeño para equipos evaluados.

Mientras que, a modo de resumen, los escenarios a evaluar se grafican en la Figura 22

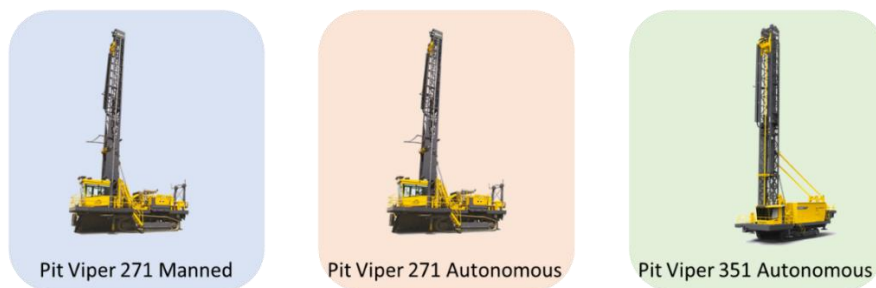


Figura 22. Escenarios a evaluar con tecnología ADS.

4. Dimensionamiento técnico de perforadoras autónomas

4.1. Plan de producción

El plan de producción al cual se le evaluará la tecnología de perforadoras autónomas contempla la explotación de una gran minera del norte de Chile por un periodo de 25 años, donde el año 2025 involucra al último cuartil de este. El equipo planificado para la perforación manual corresponde a la Pit Viper 271, marca Epiroc.

Con un requerimiento máximo de 10 perforadoras manuales y una producción anual promedio sin remanejos de 109 *Mton*, se propone realizar un ejercicio en el cual se considere la incorporación de una flota de perforadoras autónomas.

La producción anual del plan minero se observa en el Gráfico 1, cabe destacar que el plan no considera remanejos anuales ni los últimos años, esto debido a que la perforación no tiene relación con los movimientos en stocks que pueda haber.



Gráfico 1. Plan de producción a analizar.

Con un promedio de 109 *Mton* y, tal como muestra el gráfico, la producción máxima corresponde a 135 *Mton*, alcanzado el año 2037. Por otro lado, se observa una baja y posteriormente un alza durante el año 2046, esto se debe a que como se mencionó anteriormente, el plan expuesto no considera remanejo debido a que el proceso de perforación no tiene relación absoluta con el movimiento de stocks, por lo que, a pesar de observarse una baja en el plan, esto se compensa con remanejo de material para tener una alimentación constante a la planta.

Respecto al detalle de la distinción entre lastre y mineral, considerando que cada uno de estos requiere un trato diferente respecto al movimiento posterior de estos, se presenta a continuación en él la relación estéril mineral del plan de producción:

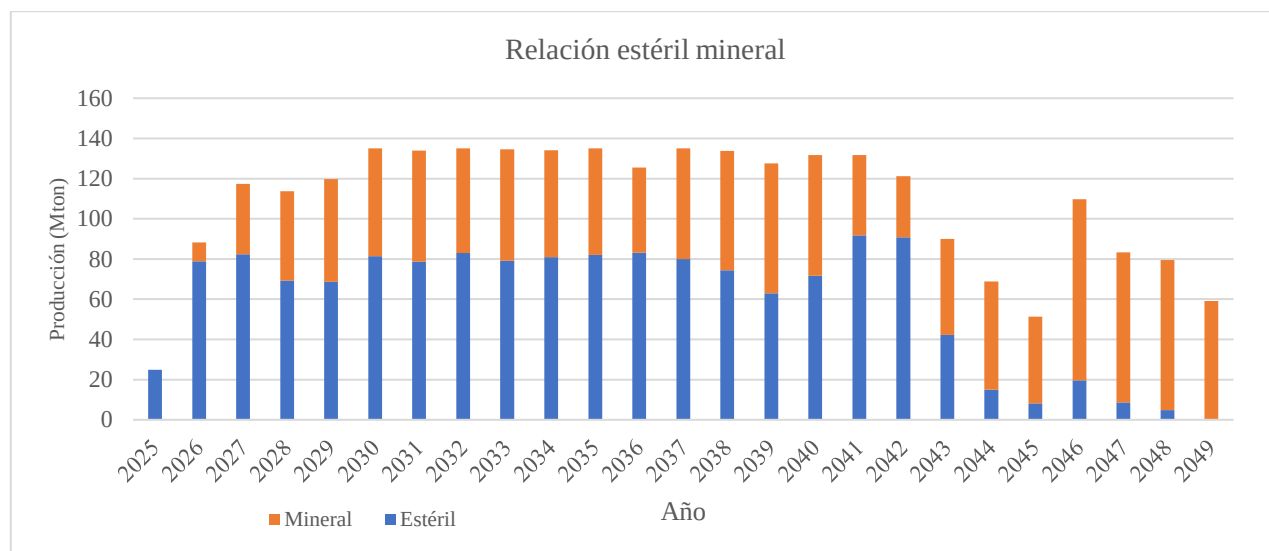


Gráfico 2. Plan de producción con segregación estéril / mineral.

Donde la mayor relación se da el año 2026 con una relación de 8.3 debido a los índices marginales de extracción de mineral los primeros años, mientras que el menor los años 2047 y 2046 con relación E/M de 0.1, esto, omitiendo los años límite que corresponden a una extracción total de lastre y mineral respectivamente.

4.2. KPI perforación manual

Respecto al caso manual, se tienen identificados los principales KPI a mejorar por parte de la autonomía, los cuales son los de principal relevancia a la hora de dimensionar la respectiva flota. De tal manera, estos se exponen en la Tabla 2, los cuales buscarán ser mejorados por la autonomía.

Tabla 2. KPI de perforación PV271 Manual.

KPI PV271 Manual	Valor
Disponibilidad	81%
Utilización efectiva	35%
Rendimiento efectivo	28 m/hr. efectiva

4.3. Flota de perforadoras y dotación caso manual

El caso por analizar contempla un vector de perforadoras PV271 de la compañía Epiroc, requerimiento que se obtiene del cruce entre los tonelajes requeridos con metros por perforar, disponibilidad y utilización de los equipos y rendimientos de las perforadoras. Varios de los cuales la autonomía en su promesa de valor promete mejorar en pos de aumentar la productividad y así, en ciertos casos, incluso disminuir los requerimientos de estos, lo que se traduciría en ahorros de inversión y costos de operación, además de salarios para los respectivos operadores que estarían a cargo de tales equipos.

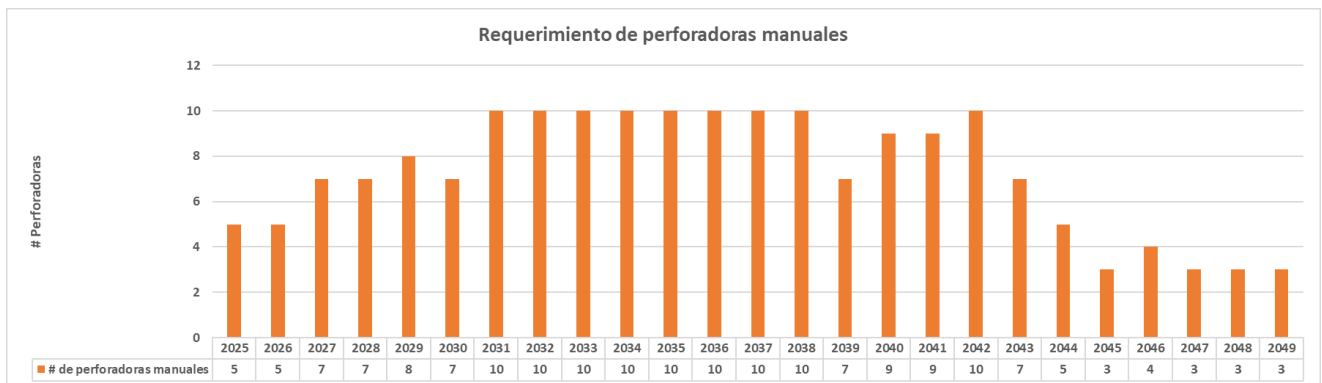


Gráfico 3 Requerimiento de perforadoras manuales según plan minero.

Los equipos deben ser operados por personal dedicado, por lo que, para conocer el número de operadores para tal perfil de equipos, se debe considerar, un trabajador durante un año, en un turno 7x7 y tomando dos (2) turnos por día, de los 365, para cada trabajador le queda un total de 183 días por trabajar. Luego de ello, se toman ciertos días descontados en función de tres grandes palancas, las que se especifican en la Tabla 3:

Tabla 3. Configuración días descontados

Distribución días descontados		
4.6	Ausentismo	2.5%
5	Capacitación	2.7%
15	Vacaciones	8.2%
1	Otros	0.5%

- **Ausentismo:** Se proyecta un estimado de días donde el trabajador no asiste sin motivo de antemano, basado en un valor benchmark se toma una proporción de un 2.5% del año, traducido en 4.6 días.

- **Capacitaciones:** Considera cierta cantidad de días donde el trabajador se encuentra en capacitación, inducción o similares. Para efectos de este ejercicio se representa como 5 días.
- **Vacaciones y otros:** Considera días de vacaciones y días administrativos que el personal tiene a disposición en forma legal. Para este ejercicio representa un 8.2% y 0.5% del año, 15 y 1 día respectivamente.

Tras considerar tales descuentos, la cobertura total por persona es de 157.4 días. Finalmente, se calcula el ratio o factor dotacional en función del potencial total de trabajo, versus la cobertura total por persona. Se evidencia tal ejercicio en la Figura 23.

Turnos totales "T"	730
Cobertura trabajador "C"	157.4
Factor dotacional (T/C)	4.63

Figura 23. Factor dotacional para el ejercicio a estudiar.

Así, considerando la flota de perforadoras proyectada en el caso manual, sumado al factor dotacional y los indicadores de utilización operativa y disponibilidad es que se calcula la dotación de operadores manuales tal como lo indica la Tabla 4.

Tabla 4. Dotación de operadores de perforadoras manuales.

	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042	2043	2044	2045	2046	2047	2048	2049
# Perforadoras	5	5	7	7	8	7	10	10	10	10	10	10	10	10	7	9	9	10	7	5	3	4	3	3	3
% Disp	83%	83%	83%	83%	83%	83%	83%	83%	83%	83%	83%	83%	83%	83%	83%	83%	83%	83%	83%	83%	83%	83%	83%	83%	83%
% Ut Op	95%	95%	95%	95%	95%	95%	95%	95%	95%	95%	95%	95%	95%	95%	95%	95%	95%	95%	95%	95%	95%	95%	95%	95%	95%
Total operadores	20	20	28	28	32	28	40	40	40	36	40	36	40	36	28	36	36	36	28	20	16	16	12	12	12

En este caso, el máximo requerimiento de operadores manuales corresponde a 40.

4.4. Mejoras a modelo de uso de tiempos

La perforación autónoma, además de los beneficios en términos de seguridad, menor variabilidad, fidelidad al plan minero y mejoras en el uso de los componentes, presenta el aumento del uso del equipo por diversos factores a favor, lo que a la larga se traduce en un aumento en la productividad del equipo y que, en algunas situaciones, incluso permite prescindir del requerimiento de cierta cantidad de equipos de perforación comparado al caso manual.

Así, se muestra un desglose de las categorías que se ven beneficiadas o perjudicadas según sea el caso, al momento de implementar la perforación autónoma, donde es posible identificar los puntos en que existirá un beneficio por parte de la tecnología, otros en los cuales no existirá modificación debido a que esta no incide en lo absoluto, mientras que ciertos puntos se verán perjudicados directamente por la implementación de la tecnología, estos se ven a continuación:

- i. **Mantenimiento programada:** En términos de tiempo, disminuyen los tiempos de mantenimiento considerando que la tecnología permite operar con menor variabilidad y mayor confiabilidad los equipos, llevando a cabo sus labores en base a los esfuerzos calculados por el sistema, extendiendo la vida útil del equipo y sus componentes.

Tabla 5. Mantenimiento programada con ADS.

Mantenimiento Programada		
Reduce	Mantiene	Aumenta
Accesorios		
Monitoreo Condición		
PM		
Relleno Lubricante/Engrase		
		Sistemas ADS

- ii. **Mantenición no Programada:** en este caso, se reduce la cantidad de tiempo de mantención no programada considerando que la tecnología opera de manera más confiable los equipos, pero en lo que corresponde a fallas asociadas al hardware y software para la operación autónoma se añaden nuevos tiempos en aumento. Además, debido a la ausencia de personal en el equipo, no es necesario realizar mantenciones a sistemas de radio de comunicación del equipo, sistema de somnolencia, aire acondicionado, calefacción, entre otros, por lo que tales tiempos van en beneficio de la tecnología.

Tabla 6. Mantención no programada con ADS.

Mantención No Programada		
Reduce	Mantiene	Aumenta
	Espera	
	Accesorio - Otros Componentes	
	Revisión Equipo	
	Monitoreo de Condición	
	Relleno Lubricante/Engrase	
	Sistema de Lubricación Automática	
	Sistema Contra Incendio	
	Apoyo Operaciones	
	Extensión del Mantenimiento	
Radio Comunicación Comercial	Mantenimiento no Programado por Oportunidad	
Sistema Somnolencia	Retrabajo	
Sist Aire Acondicionado	Sistema Aire	
Calefacción	Motor	
Radio Base/Com. Radial		
Cabina		
		Sistemas ADS

- iii. **Demoras programadas:** Para las demoras programadas, por los cambios de integrar la tecnología y la reducción de personal que implica contar con esta, se desprende la capacidad del sistema para operar múltiples perforadoras en simultáneo, por lo que las pérdidas por parte de la perforación manual en cambios de turno, colación y los traslados que involucran ambas acciones, se ven totalmente reducidos, pudiendo operar los equipos sin necesidad de detenerse por tales razones.

Tabla 7. Demoras programadas en ADS.

Demora Programada		
Reduce	Mantiene	Aumenta
Cambio de Turno		
Traslado a Colación o retiro de colación		
Colación		
		Sistemas ADS

- iv. Demoras No Programadas:** En lo que corresponde a las demoras no programadas, se reducen los tiempos que se presentan en los casos manuales para relevos de operador u operador fuera del equipo debido a que, en este caso al requerir una menor cantidad de personal, el que a su vez se encuentra desde un centro de comando, es posible mitigar tales ausencias en menor tiempo. Por el lado de la polución, como el equipo funciona con ubicaciones programadas digitalmente y al no ser operado directamente por un humano, es que tales tiempos son reducidos de igual manera. Mismo caso con la somnolencia, esta no es un factor debido a que el personal no se encarga de manipular la perforadora directamente, lo que además de mejoras en el tiempo de uso del equipo, elimina la exposición al personal. Mientras que, en términos de abastecimiento de agua y combustible, los tiempos se ven perjudicados debido a que un mayor uso del equipo involucra un mayor requerimiento de estos. En el caso particular de las perforadoras eléctricas, debe considerarse además atrasos en tiempo por movimiento de cables ya sea por alcance o cambio entre filas. Además, el sistema ADS puede involucrar aumentos por las excepciones que se puedan presentar durante la operación, fallas satelitales por tormentas solares, o interacciones que se puedan dar con otros equipos debido a malas programaciones del sistema.

Tabla 8. Demoras No Programadas en ADS.

Demoras No Programadas		
Reduce	Mantiene	Aumenta
	Traslado de equipo	
	Tronadura	
Relevo Operador		
Operador fuera del equipo		
Polución		
	Condición Subestándar	
	Evento Geotécnico	
	Mina en emergencia	
Somnolencia		
		Carga o espera de combustible
	Requerimiento de equipo de apoyo	
		Movimiento de Cables
	Corte de energía operacional	
	Topografía	
	Cambio de tricono o martillo	
	Cambio o rotación de barra	
		Abastecimiento de agua
	Sin marcas o malla	
		Excepciones
		Falla Satelital
		Interacción Entre Equipos

- v. **Reservas:** El mayor cambio que se presenta en las reservas es el aumento de tiempo por la disponibilidad de patios de perforación con los requerimientos que la tecnología exige, ya ingresando la geocerca al sistema, así como también disponiendo el espacio. Mientras que los tiempos que reducen van directamente por interacción del operador con el estado de “con” y “sin” operador.

Tabla 9. Reservas con ADS.

Reservas		
Reduce	Mantiene	Aumenta
Con Operador		
Sin Operador		
	Factor Climático	
	Factor Externo	Patio de Perforación
		Sistemas ADS

4.5. Demoras e indisponibilidades asociadas a tecnología ADS

La tecnología en sí también cuenta con demoras intrínsecas al funcionamiento de la tecnología, las cuales, si bien en conjunto requieren menos demanda de tiempo que el sistema de perforación tradicional, también deben estar mapeadas y consideradas para optimizar y aprovechar el uso de la tecnología. Ante tal razón, a continuación, se enlistan las principales razones que generan contratiempos ya sea en la operación o en su defecto tiempo requerido para mantener la tecnología:

- Falla de autonomía
- Falla de red
- Falla GPS
- Interacción entre equipos
- Interacción con otros equipos
- Sin área de perforación
- Sin malla asignada

Estos puntos de demoras distan de lo que corresponde a una perforación manual, por lo que, si bien hay puntos que se pueden prevenir o minimizar, hay otros que requieren de una correcta comunicación entre las áreas para poder utilizar o aprovechar al máximo el tiempo que se tiene a disposición de los equipos.

Por consiguiente, y considerando las mejoras o puntos en contra que se levantaron tras analizar las distintas actividades o razones en los apartados de la distribución del uso del tiempo, se levantó la diferencia principal entre los indicadores de disponibilidad y utilización efectiva entre los equipos planificados, y la propuesta de mejora a través de la autonomía, los cuales se ven en la Tabla 10.

Tabla 10. Comparación de indicadores Manual – autónomo.

Parámetro	Perforadora Manual	Perforadora Autónoma
Disponibilidad (%)	81	84
Utilización efectiva (%)	35	60
Horas efectivas (hr)	6.8	12.1

4.6. Rendimientos ADS

La perforación autónoma permite una menor variabilidad del proceso, y un mejor uso de los equipos, debido a eso, los KPI tanto de indicadores, así como también de rendimientos efectivos verán una mejora respecto al caso manual, los cuales se distinguen en la Tabla 11, siendo así tales KPI el input principal para el dimensionamiento de los equipos de perforación autónoma.

Tabla 11. Parámetros de desempeño por equipo de perforación autónoma.

Parámetro	Valor PV 271	Valor PV 351
Rendimientos [m/h]	31	38
Longitud pozo [m]	16	
Cambio de pozos [min]	~ 3.6	
Holgura mineral [días]	4	
Holgura lastre [días]	2	
Disponibilidad [%]	84%	84%
Utilización [%]	60%	60%
Toneladas por pozo	3.0	3.2

4.7. Dimensionamiento caso ADS

4.7.1. Metodología dimensionamiento de perforadoras

En el caso de las perforadoras se debe poner especial atención a las fases que se encuentran activas en los respectivos años, además del ritmo de perforación que se exige por parte del plan minero. Por otra parte, las capacidades de perforación que puede entregar un equipo dependen de variables que involucran por un lado el modelo de uso de tiempos de la perforadora entregando así las horas de operación efectiva del equipo, así como también las capacidades de perforación que tiene el equipo respecto a la geología del sector y las tecnologías incorporadas por parte de la perforadora en cuestión.

Así, la metodología que se llevará a cabo relaciona directamente el requerimiento de horas efectivas por parte del plan minero para cumplirlo a cabalidad, con las horas que una perforadora puede operar durante un periodo de tiempo determinado. En este caso, como el quiebre del plan minero distribuye cada periodo como un año, es que se debe calcular el requerimiento de horas efectivas a desarrollarse en cada uno de estos, según las capacidades de los equipos manuales como los autónomos puedan rendir. En la Figura 24 se observa la lógica detrás del dimensionamiento de perforadoras y sus respectivos inputs.

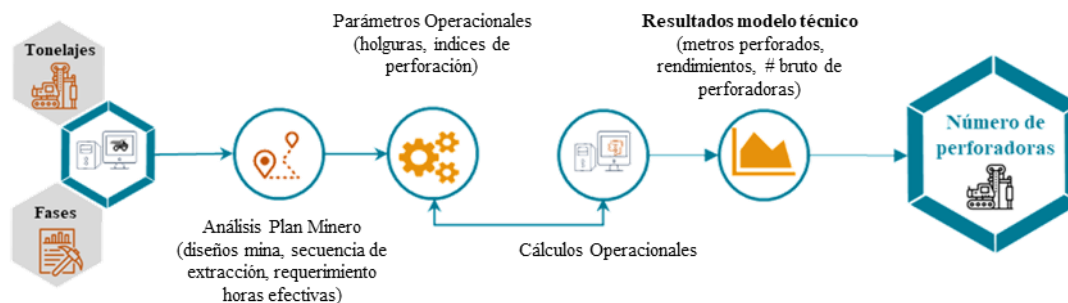


Figura 24. Metodología de cálculo para dimensionar perforadoras.

4.7.2. Dimensionamiento de perforadoras autónomas

Para llevar a cabo el ejercicio de requerimiento de equipos de perforación en modalidad autónoma, es que se presentan las características de desempeño por equipo en cada uno de los casos, además de los indicadores e inputs a utilizar dentro del ejercicio de requerimiento de equipos según plan minero.

Además, es importante visualizar los metros a perforar por cada una de las respectivas flotas, debido a eso, se ha realizado un análisis minucioso del plan minero en cuestión, donde se han levantado los siguientes hallazgos:

En términos operativos, la perforación adelantada de patios permite mayor disposición de puntos de carguío para las palas por medio de tronaduras adelantadas, de modo de no atrasar la labor fundamental que estas cumplen dentro de la mina, además, permite que la labor de muestreo de mineral se pueda llevar a cabo con tiempo sin involucrar riesgos de quienes ejecuten tal labor, añadido a lo anterior, con mayor cantidad de patios perforados es posible reducir la cantidad de tronaduras por semana, dándole mayor continuidad a la operación que se ve detenida en tal instancia.

Debido a esto, una de las consideraciones tomadas para el ejercicio de dimensionamiento en perforadoras autónomas corresponde a incrementar el requerimiento de metros al año para adelantar la perforación, considerando un extra de 4 días para el mineral y 2 días para el lastre, contemplando la importancia de que los equipos de carguío tengan la certeza de que el mineral estará siempre disponible para ser cargado, mientras que se asegure la disposición de lastre para continuar con lo planificado previamente.

Los parámetros considerados así, para el cálculo del requerimiento de los equipos, se plantearon en base a los rendimientos y tiempos fijos correspondientes. Estos se dan a conocer en la Tabla 10, siendo las horas efectivas del orden de 12.1 (*hr*), y donde si bien la utilización es de un 60%, al momento de aplanar el vector en la flota, este será un indicador

el cual se verá reducido, ya que por lo general el primer cálculo de flota implica valores no enteros, y al redondear este número al siguiente entero, queda una brecha que permite la baja en la utilización.

Por otra parte, la malla de perforación considerada en el plan minero a estudiar contempla una malla de 8 x 9 m, donde, con una densidad de roca de 2.6 ton/m^3 y una altura de pozo de 16 m (contemplando una pasadura de 1 m), es que se determina que el índice de perforación ($\frac{\text{ton}}{\text{m}}$) y, por consiguiente, las toneladas a tronar por pozo para los respectivos equipos se observan en la Tabla 12.

Tabla 12. Índices de perforación y toneladas tronadas por pozo según equipo.

Equipo perforación	Índice de perforación ($\frac{\text{ton}}{\text{m}}$)	Toneladas por pozo(ton)
PV271	187	3000
PV351	200	3200

Con el uso más efectivo de los equipos de perforación, y considerando las mayores capacidades de perforación del equipo PV351 debido a sus mayores dimensiones y capacidades mecánicas, es que se refleja la mejora en el rendimiento efectivo de los equipos autónomos respecto a la PV271 manual, siendo este uno de los principales inputs a generar diferencias dentro del dimensionamiento de flota, los cuales se ven en la Tabla 13.

Tabla 13. Rendimientos efectivos perforadoras evaluadas.

Equipo	Rendimiento efectivo (m/hr. Efectiva)
PV271 Manual	28
PV271 ADS	31
PV351 ADS	38

Es así, como los requerimientos de metros a perforar por los respectivos equipos, tomando la consideración de la perforación adelantada, se distribuye de la siguiente forma:

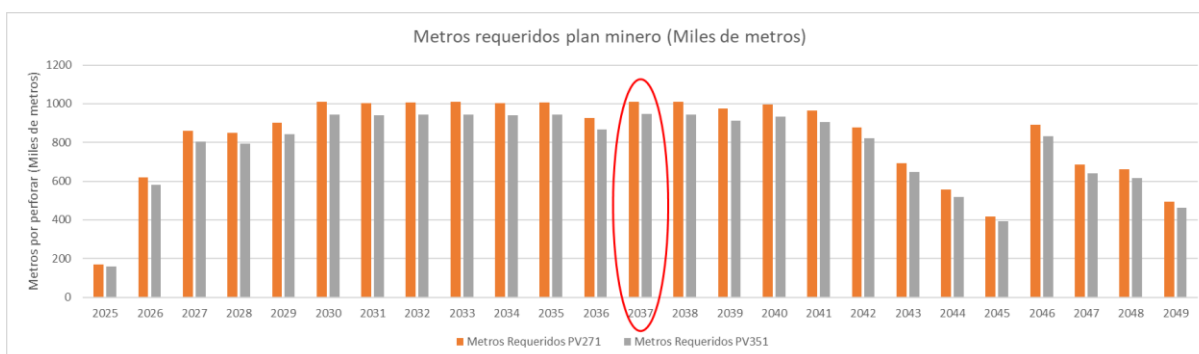


Gráfico 4. Requerimiento (miles de metros) según equipos, de metros por perforar.

Del gráfico expuesto anteriormente se deduce, tal como se comentó, que el requerimiento de metros por perforar para la PV351 se reduce debido a su mayor capacidad de perforación a diámetros mayores. En ambos casos el año de mayor requerimiento en metros por perforar corresponde al 2037, lo que implica directamente el máximo requerimiento para equipos de perforación.

Así, tras obtener los indicadores de disponibilidad, utilización, y parámetros de desempeño, con el cálculo:

$$Hrs. efectivas = Tiempo nominal \times disponibilidad \times utilización efectiva$$

Se proyecta que cada perforadora cuente con 12.1 (*hr*) efectivas por día, resultando así en un avance de 375 y 460 (*m / día*) para la PV271 y la PV351 respectivamente. Generando así la proyección de 8550 y 10490 (*pozos/año*) de 16 (*m*) en el mismo orden de equipos. Ahora bien, el requerimiento en las flotas puede ser variable en el año, según las condiciones del sitio, cantidad de metros objetivo por perforar, etc. Pero este valor debe aplanarse en el largo plazo para que el modelo sea viable económica y operativamente, debido a que, de haber bajas en el uso de la cantidad de equipos puede ir en detrimento de la variabilidad del proceso, donde es más conveniente continuar con la misma flota que se trae los periodos anteriores por temas contractuales con operadores, costos y requerimientos de insumos constantes, etc.

Tras cruzar la información del desempeño de los equipos con el plan minero, es posible conocer el requerimiento de flota para las perforadoras autónomas en cada uno de los escenarios propuestos con la siguiente relación:

- $\text{metros día perforadora} = 24 \times \text{disp.} \times \text{UEBD} \times \text{rendimiento ef. perforadora} \quad (1)$
- $\text{metros perforados por año} = \text{metros por día por perforadora} \times \text{días año} \quad (2)$
- $\text{pozos por año} = \frac{\text{metros perforados por año}}{\text{largo pozo}} \quad (3)$
- $\text{toneladas por perforadora} = \text{pozos por año} \times \text{toneladas por pozo} \quad (4)$
- $\# \text{ Perforadoras} = \frac{\text{necesidad tonelaje mineral} + \text{lastre}}{\text{toneladas por perforadora}} \quad (5)$

Con este paso a paso es posible obtener el **requerimiento bruto de perforadoras**, resultando evidente la mejora en un requerimiento menor respecto al caso manual a comparar, el cual cuenta con un máximo de 10 perforadoras.

Así, a continuación, se presentan los valores entregados por cada ejercicio en perforadoras autónomas PV271 y PV351 donde se distingue de antemano una predominancia en la capacidad de tonelaje por perforar de parte de la PV351:

Parámetros PV271	Valor
Horas efectivas (hr)	12.10
Disponibilidad Física (%)	84%
Utilización Efectiva (%)	60%
Rendimiento (m/hr)	31
Metros/día por perforadora	375
Total metros por Año	136,866
Pozos por año	8,554
Tonelada/Perforadora por año	25,662,420

Figura 25. Resultados promedio del ejercicio para PV271.

Parámetros PV351	Valor
Horas efectivas (hr)	12.10
Disponibilidad Física (%)	84%
Utilización Efectiva (%)	60%
Rendimiento (m/hr)	38
Metros/día por perforadora	460
Total metros por Año	167,772
Pozos por año	10,486
Tonelada/Perforadora por año	33,554,304

Figura 26. Resultados promedio del ejercicio para PV351.

En este caso, el requerimiento máximo de perforadoras PV271 corresponde a **8** equipos, mientras que para las PV351 un máximo de **6** perforadoras, diferencia que se debe a lo explicado anteriormente referido a las capacidades de cada uno de estos modelos (mayor capacidad de perforación y tonelaje tronado por pozo).

Así, tras los cálculos realizados, se aprecia una disminución del 20% para el caso de las PV271 (mismo modelo en su modalidad autónoma) y una disminución de un 40% para las PV351 respecto al máximo de la flota. Mientras que, respecto al requerimiento por periodos, se aprecia en el Gráfico 5 cómo se distribuye en el tiempo.



Gráfico 5. Requerimiento de flota manual y autónomas en LOM.

Además, al aproximarse y aplanarse los respectivos requerimientos de la flota, la utilización efectiva de los equipos se ve afectada, al punto de disminuir en la práctica, ya que, se está realizando la labor propuesta en primera instancia con una flota mayor. Así, de iniciar con un input de un 60% de utilización efectiva, se observa en el Gráfico 6 que en ambos casos se ve sustancialmente disminuida la utilización, resultando en un promedio de 52%.

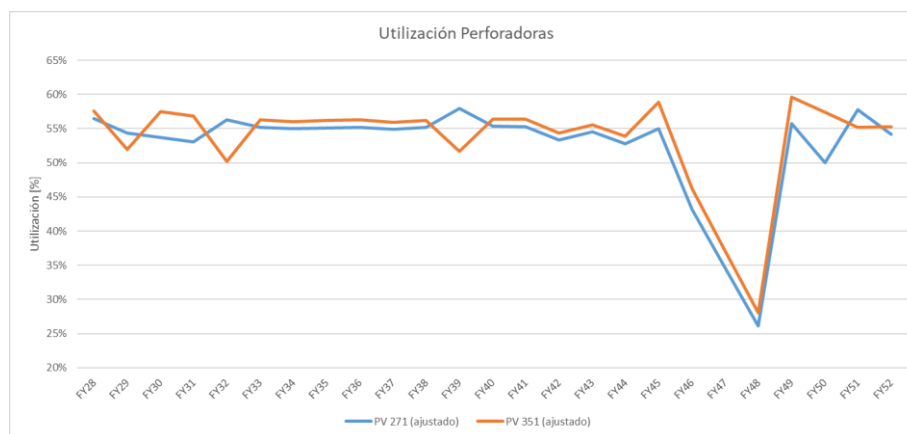


Gráfico 6. Utilización actualizada en perforadoras autónomas.

4.7.3. Dotación personal de autonomía

Respecto al personal de la perforación autónoma, se identifican nuevos requerimientos para los distintos cargos, tanto para operaciones, mantenimiento y supervisión. De antemano, se recomienda incorporar un especialista de autonomía por turno, independiente del número de perforadoras en operación.

Operadores en sala: El criterio de requerimiento para el personal de operadores en sala se muestra en la Tabla 14.

Tabla 14. Operadores en sala según número de perforadoras autónomas.

# Perforadoras	1	2	3	4	5	6	7	8
Operadores en sala	1	2	2	2	3	3	3	3

Así, el requerimiento de **operadores en sala** se observa en Tabla 15 y Tabla 16 con un máximo de 14 operadores en ambos casos.

Tabla 15. Número de operadores en sala para PV271.

	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042	2043	2044	2045	2046	2047	2048	2049
# Perforadoras PV271	5	7	7	7	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	7	7	7	7	7	6	5	4	4
% Disp	84%	84%	84%	84%	84%	84%	84%	84%	84%	84%	84%	84%	84%	84%	84%	84%	84%	84%	84%	84%	84%	84%	84%	84%	84%
% Ut Op	95%	95%	95%	95%	95%	95%	95%	95%	95%	95%	95%	95%	95%	95%	95%	95%	95%	95%	95%	95%	95%	95%	95%	95%	95%
Total operadores	10	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	10

Tabla 16. Número de operadores en sala para PV351.

	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042	2043	2044	2045	2046	2047	2048	2049
# Perforadoras PV351	3	4	5	5	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	5	5	5	5	5	4	4	3
% Disp	84%	84%	84%	84%	84%	84%	84%	84%	84%	84%	84%	84%	84%	84%	84%	84%	84%	84%	84%	84%	84%	84%	84%	84%	84%
% Ut Op	95%	95%	95%	95%	95%	95%	95%	95%	95%	95%	95%	95%	95%	95%	95%	95%	95%	95%	95%	95%	95%	95%	95%	95%	95%
Total operadores	10	10	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	10	10	10

Personal de supervisión: Los operadores de patio realizarán las labores de supervisión requeridas por la tecnología, el cual, al igual que el personal de operación está condicionado por el factor dotacional, además del número de perforadoras que operan en paralelo como se ve en la Tabla 17.

Tabla 17. Personal de supervisión por perforadora autónoma.

# Perforadoras	1	2	3	4	5	6	7	8
Operadores de patio	1	1	1	2	2	2	3	3

Así, los **operadores de patio** se observan en las siguientes tablas:

Tabla 18. Supervisores de patio para PV271 autónoma.

	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042	2043	2044	2045	2046	2047	2048	2049
# Perforadoras PV271	5	7	7	7	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	7	7	7	7	7	6	5	4	4
% Disp	84%	84%	84%	84%	84%	84%	84%	84%	84%	84%	84%	84%	84%	84%	84%	84%	84%	84%	84%	84%	84%	84%	84%	84%	84%
% Ut Op	95%	95%	95%	95%	95%	95%	95%	95%	95%	95%	95%	95%	95%	95%	95%	95%	95%	95%	95%	95%	95%	95%	95%	95%	95%
Total supervisores	10	10	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	10	10	10

Tabla 19. Supervisores de patio para PV351 autónoma.

	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042	2043	2044	2045	2046	2047	2048	2049
# Perforadoras PV351	3	4	5	5	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	5	5	5	5	5	4	4	3
% Disp	84%	84%	84%	84%	84%	84%	84%	84%	84%	84%	84%	84%	84%	84%	84%	84%	84%	84%	84%	84%	84%	84%	84%	84%	84%
% Ut Op	95%	95%	95%	95%	95%	95%	95%	95%	95%	95%	95%	95%	95%	95%	95%	95%	95%	95%	95%	95%	95%	95%	95%	95%	95%
Total supervisores	5	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	5

Mantenedores: El mantenimiento de los componentes autónomos comienza como una labor del proveedor, considerando el entendimiento que tiene para con su propia tecnología, pero que con un proceso de traspaso de conocimientos los primeros meses de operación, interiorizará tal labor con el personal de mantenimiento presente en faena, por lo que la dotación de mantenedores no se verá alterada.

4.7.4. Plan táctico de implementación

Introducir una nueva tecnología a la operación implica una gestión del cambio dentro de la misma, de manera que el implementar la perforación autónoma en este caso, cause el menor impacto posible en términos de productividad debido a mal uso o conocimiento de la tecnología, compromisos que no puedan cumplirse en el corto plazo, déficit de infraestructuras, entre otros. Por esta razón, se debe dejar estipulado un periodo que permita madurar la tecnología, además de evitar comprometer la producción planificada al momento de generar el retrofit de los equipos. Las principales consideraciones para un plan táctico de implementación de la tecnología son las siguientes:

- Tener en cuenta que un periodo promedio de instalación de la tecnología en los equipos ronda entre 3 a 4 semanas si los equipos no vienen autónomos de fábrica.
- La infraestructura de redes debe estar previamente estudiada e instalada para contar con una cobertura en todas las zonas en que se prevé realizar la perforación, además de contar con los requisitos mínimos que exige la tecnología para el traspaso de información e imagen.
- Una vez comisionado el equipo, idealmente comenzar a perforar en áreas que no comprometan alimentación a planta, es decir, perforación de lastre. Con el propósito de no arriesgar la producción en el proceso de maduración de la tecnología.
- Realizar la instalación de equipos a un ritmo de 1 a 2 perforadoras a la vez, de manera de evitar arrendar equipos adicionales, sino más bien realizar una perforación adelantada equivalente a un equipo.

5. Valorización escenarios

5.1. Costos habilitantes tecnología autónoma

Para implementar la tecnología, se debe poner especial atención a dos frentes: invertir en la tecnología y sus habilitantes, e invertir en un equipo de implementación interno que permita desarrollar el proyecto con éxito, además de asegurar que el traspaso a la operación sea llevado a cabo de la mejor manera. Se pondrá especial énfasis en el primer apartado, sin dejar atrás las principales consideraciones para que el equipo de implementación pueda mapear las actividades por desarrollar de antemano, incluyendo la gestión del cambio organizacional y general que implica relacionarse con una nueva tecnología.

Los apartados principales para la valorización de implementar y mantener la autonomía de perforadoras se categorizan en:

- I. **Hardware y software:** considera el kit para transformar la perforadora manual en autónoma, además de la plataforma para manipular la tecnología.
- II. **Infraestructura:** centro de comando o sala de control, y las redes de comunicación dedicadas a la tecnología.
- III. **Proyecto:** instalación de kits y centro de comando, comisionamiento, acompañamiento y soporte inicial, equipo dedicado a perforación autónoma, etc.
- IV. **Entrenamientos:** programas de capacitación a operadores, mantenedores, staff en general, se recomiendan capacitaciones teórico-prácticas, en algunos casos con simuladores o en su defecto directamente con los equipos en cuestión.
- V. **Repuestos críticos:** listado de repuestos críticos que, por cultura operacional, puedan requerirse con mayor frecuencia que la vida útil de estos signifique, o en su defecto, por la experiencia del proveedor respecto a la duración que puedan tener.

Así, considerando cada uno de los apartados previamente mencionados, se levanta un valor aproximado de los costos de inversión que involucra el implementar y operar autonomía de perforadoras:

CAPEX	Ítem	Precio unitario (USD)
Hardware	Kit ADS	1,050,000
	Half Rack	140,000
Sala de control	OPS	57,000
Redes de comunicación	Red Radwin	1,500,000
Proyecto	Project leader	12,000
	Champion Project	17,000
	Instalación de Kits Autonomía	60,000
	Comisionamiento Kits Autonomía	10,000
	Soporte en implementación	140,000
Capacitaciones	Capacitación Personal	270
Servicio de Diagnóstico	Diagnóstico Perforadora	16,500
Repuestos Críticos	Repuestos Críticos de Sistema Autónomo (ADS)	200,000

Figura 27. Costos de inversión tecnología autónoma.

OPEX	Ítem	Precio unitario (USD)
Redes de comunicación	Operación red Radwin	500,000
	Soporte IM 3	144,000
Costos ADS	Licencias ADS	32,000
	Repuestos críticos	15,000

Figura 28. Costos de operación tecnología autónoma.

Estos inputs consideran los valores unitarios de cada uno de estos, los cuales se detallan a continuación:

- Los costos de **compra** de las respectivas perforadoras
- El costo del **kit** para realizar la conversión de perforadora manual a autónoma
- El **half rack** de la sala de control, es decir, el sistema que permite monitorear un máximo de 3 perforadoras por cada uno, por lo que el máximo a utilizar en el ejercicio considera 4 half rack.
- La **sala de operación**, donde se albergan los racks de operación autónoma.
- La inversión de implementar una **red radwin** de comunicaciones dedicada a la autonomía de perforadoras, tanto respectivos estudios de ingeniería, como instalación y puesta en marcha de la red.
- **Project leader y champion project** como miembros del equipo experto de implementación, estos roles son considerados por parte del proveedor y el costo presentado corresponde al costo mensual de cada uno de estos profesionales incluyendo movilización y desmovilización, el cual se estimará en un periodo de un año.

- **La instalación y comisionamiento** de los kits de autonomía, dentro del desarrollo de instalaciones de equipos se incorpora tal actividad que involucra acondicionar y preparar al equipo de perforación para que pueda ser operado con el modo autónomo.
- **Soporte en implementación** involucra las labores de soporte en sitio y remotos mientras se lleva a cabo el periodo de adaptación de la tecnología, equipos enfocados en resolver problemas y fallas de la tecnología con un asesoramiento experto, cargo que al largo plazo se debe interiorizar en la operación con equipos dedicados, se estima que tal periodo sea de 6 meses aproximadamente.
- Las **capacitaciones** del personal en pos de entrenar y crear habilidades en operadores que dejarán de desarrollar sus labores comunes de perforación manual, con la intención de fomentar el reposicionamiento de operadores y perfeccionar las competencias afines al uso de la autonomía de perforadoras. El costo presentado corresponde al costo por hora para una determinada cantidad de operadores, suficientes para la faena a estudiar.
- Los costos de **operar la red radwin** para la autonomía
- El **soporte remoto** que puede entregar el proveedor en caso de que los problemas que se puedan presentar en la operación no sea posible resolverlos por parte del equipo interno.
- Las **licencias del uso del software** asociado a la perforación autónoma de parte del proveedor.
- Por último, el listado de **repuestos críticos de autonomía**, el cual se determina en base a experiencia del proveedor y el comportamiento de la operación evaluada, el stock debe permanecer presente en bodega ante cualquier situación particular, se propone 6 recargas de stock a lo largo de lo que dura la operación.

De tal manera, los costos tanto de inversión como de operación de la tecnología, es posible proyectarlos al largo plazo, considerando que la operación contemplará 25 periodos con los correspondientes requerimientos de equipos para cada uno de los casos. De esa manera, es posible distinguir en primera instancia los respectivos costos que se asocian a la tecnología como habilitante para operar la autonomía de perforadoras.

En primera instancia, se presentan los totales correspondientes a operar con PV271, costos que se observan en la Figura 29.

CAPEX	Ítem	Precio unitario (USD)	Cantidad	Total
Compra equipos	Perforadora PV271	3,300,000	8	26,400,000
Total CAPEX compra equipos (US\$)				26,400,000
Hardware	Kit ADS	1,050,000	8	8,400,000
Sala de control	Half Rack	140,000	1	140,000
	OPS	57,000	3	171,000
Redes de comunicación	Red Radwin	1,500,000	1	1,500,000
Proyecto	Project leader	12,000	12	144,000
	Champion Project	17,000	12	204,000
	Instalación de Kits Autonomía	60,000	8	480,000
	Comisionamiento Kits Autonomía	10,000	8	80,000
	Soporte en implementación	140,000	6	840,000
Capacitaciones	Capacitación Personal	270	300	81,000
Servicio de Diagnóstico	Diagnóstico Perforadora	16,500	1	16,500
Repuestos Críticos	Repuestos Críticos de Sistema Autónomo (ADS)	200,000	2	400,000
Total CAPEX sistema ADS (US\$)				12,456,500

OPEX	Ítem	Precio unitario (USD)	Cantidad	Total
Redes de comunicación	Operación red Radwin	500,000	25	12,500,000
Costos ADS	Soporte IM 3	144,000	25	3,600,000
	Licencias ADS	32,000	25	800,000
	Repuestos críticos	15,000	23	345,000
Total OPEX sistema ADS (US\$)				17,245,000

Figura 29. Costos totales asociados a incorporar tecnología con modelo PV271

Por otra parte, los correspondientes a la PV351, se presentan en la Figura 30.

CAPEX	Ítem	Precio unitario (USD)	Cantidad	Total
Compra equipos	Perforadora PV351	4,000,000	6	24,000,000
Total CAPEX compra equipos (US\$)				24,000,000
Hardware	Kit ADS	1,050,000	6	6,300,000
Sala de control	Half Rack	140,000	1	140,000
	OPS	57,000	3	171,000
Redes de comunicación	Red Radwin	1,500,000	1	1,500,000
Proyecto	Project leader	12,000	12	144,000
	Champion Project	17,000	12	204,000
	Instalación de Kits Autonomía	60,000	6	360,000
	Comisionamiento Kits Autonomía	10,000	6	60,000
	Soporte en implementación	140,000	6	840,000
Capacitaciones	Capacitación Personal	270	225	60,750
Servicio de Diagnóstico	Diagnóstico Perforadora	16,500	1	16,500
Repuestos Críticos	Repuestos Críticos de Sistema Autónomo (ADS)	200,000	1	200,000
Total CAPEX sistema ADS (US\$)				9,996,250

OPEX	Ítem	Precio unitario (USD)	Cantidad	Total
Redes de comunicación	Operación red Radwin	500,000	25	12,500,000
Costos ADS	Soporte IM 3	144,000	25	3,600,000
	Licencias ADS	32,000	25	800,000
	Repuestos críticos	15,000	23	345,000
Total OPEX sistema ADS (US\$)				17,245,000

Figura 30. Costos totales asociados a incorporar tecnología con modelo PV351

Existiendo principales diferencias en los apartados del costo del equipo, el requerimiento de horas en las capacitaciones del personal, y la cantidad de kits por cada uno de los casos, debido al diferente requerimiento en los distintos modelos de equipos.

5.2. Ahorros y beneficios económicos de la autonomía

Ahora bien, tales valores se asocian a la tecnología, la cual en primera instancia considera la inversión que se debe llevar adelante para contar con autonomía de perforadoras.

Por otra parte, es posible identificar los ahorros que se presentan por el uso de la tecnología en cuestión, los cuales cualitativamente se identifican en las áreas de:

- **Costos de personal:** la posibilidad de operar equipos en simultáneo permite prescindir del costo que involucra mantener a un vector de 1.5 personas por perforadora según el promedio de operaciones tradicionales.
- **Materiales y repuestos:** dado el mejor uso de los equipos, es posible cuidar los componentes de los equipos en aproximadamente un 20%, lo cual se traduce en un aumento de la vida útil de estos, que involucra disminuir el costo de los aceros de perforación.
- **Ahorro de equipos:** el mayor uso efectivo de los equipos, y la menor variabilidad que entrega la autonomía al proceso, es que, tal como ya se ha visto anteriormente, el requerimiento de equipos de perforación disminuye, esto implica ahorros en distintos frentes; tales como, menor personal atendiendo flota, menor costo de inversión en equipos por menor requerimiento, menor costo de perforación por mejoras en uso de componentes, y vector de flota, entre otros.
- **Costo de operación:** por prescindir de un operador, evitar la re-perforación, generar una perforación más precisa, con una operación más efectiva en términos del uso del tiempo y en general un proceso con una menor variabilidad, es posible disminuir el costo de operación de la perforadora aproximadamente en un 40%. Lo cual permite estabilizar el costo mina al menos en el apartado de perforación en el largo plazo, cumpliendo así con los indicadores proyectados por planificación a largo plazo. Así, el costo de operación para cada perforadora por metro en resumen se grafica en la Tabla 20

Tabla 20. Costos de operación según equipo.

Equipo	Costo operación (US\$/m)
PV271 Manual	7,6
PV271 Autónoma	4,7
PV351 Autónoma	5,1

Según los puntos mencionados anteriormente, asociados a la disminución de los costos de operación, es que es posible vectorizar las diferencias entre los costos de operar en el largo plazo con cada uno de los escenarios, así, tras levantar los costos en la Tabla 20, se vectoriza un costo total de operación en el largo plazo para cada uno de los modelos según lo expuesto en la Tabla 21, la cual se alimenta del requerimiento en metros por perforar expuesto en el Gráfico 4.

Tabla 21. Costo de operación en el largo plazo para los escenarios a evaluar.

Equipo	Costo operación (\$MUSD)
PV271 Manual	110,4
PV271 Autónoma	68,3
PV351 Autónoma	74,1

5.3. Costo de mantenimiento

Los costos de mantenimiento asociada a una perforadora manual, entre otros, incluye variables tales como:

- Materiales y repuestos
- Combustible y lubricantes
- Mano de obra
- Contratos de mantenimiento
- Etc.

Como dato benchmark, se estima que el costo de mantenimiento anual de una PV271 equivale aproximadamente a \$250,000 USD, el cual se ve beneficiado al implementar la autonomía, con la mejora en el uso de los componentes, aceros, y el equipo en general. Por lo que un equipo autónomo se estima ahorre aproximadamente un 20% del costo de mantenimiento o materiales y repuestos. De tal manera, una PV271 manual, consideraría un costo de mantenimiento de \$200,000 USD aproximadamente, mientras que, en el caso de la PV351 manual por sus mayores dimensiones, pero componentes relativamente parecidos a la PV271, requiere un costo de mantenimiento de \$2650,000 USD aproximadamente, resultando, en el caso autónomo, de un costo de 212,500 USD. De tal manera, y según el requerimiento año a año de la flota, se puede vectorizar el costo en materiales y repuestos para la flota en cuestión.

6. Análisis de resultados

6.1. Indicadores

En el caso de la disponibilidad, se observan posibles mejoras en los tiempos de mantenimiento reflejados en 3 puntos porcentuales, mientras que la utilización por el mayor uso de la tecnología se propone un aumento de 25 puntos porcentuales respecto al caso manual, esto, debido a que los indicadores del plan de producción mina se pueden catalogar de una baja exigencia respecto al estándar de faenas en Chile, mientras que en cuanto a los indicadores resultantes de autonomía, cumplen con un valor aceptable, pero que de todas maneras puede encontrar oportunidades de mejora en el largo plazo tomando consideraciones diferentes. Además, el rendimiento efectivo por un lado por medio de la PV271 se prevé un aumento de un 10% de aumento considerando un proceso menos variable, más consistente, con un mejor uso del equipo en sí, mientras que la PV351 respecto al caso base considera un aumento del 35% en el rendimiento efectivo, considerando la mayor capacidad de perforación del modelo en sí. Resultados que se ven resumidos en la Figura 31, cabe destacar que estos indicadores se utilizan a lo largo del ejercicio para diferenciar tiempos de uso según flotas y el respectivo dimensionamiento en cuestión.



Figura 31. Cambio en indicadores para escenarios estudiados.

6.2. Requerimiento de equipos

Tal como se expuso anteriormente en los resultados, se tienen dos casos asociados a la autonomía, los cuales se contrastan directamente con el caso manual, en ellos, se ve una disminución de un 20% en el requerimiento de equipos PV271 (mismos equipos que los proyectados en el caso base), mientras que, por otro lado, un 40% de ahorro de equipos para el caso de las PV351, tal como se mencionó anteriormente, debido a su mayor capacidad de perforación. De lo observado en el requerimiento de la flota es posible deducir que el mayor tiempo de uso de los equipos por parte de la autonomía, además del aumento en el rendimiento de perforación, permite optimizar la productividad de la flota en general,

pudiendo cumplir así con el plan minero dispuesto con menor cantidad de equipos que el caso de perforadoras manuales. Incluso, considerando días de holgura tal como se mencionó anteriormente, lo que abre la oportunidad de, al implementar la tecnología, abaratar costos prescindiendo de cierta cantidad de equipos, lo que se da en distintos frentes: salarios de operadores, uso del equipo en cuestión, mantenimientos no programados por mala manipulación del equipo, mantención del equipo en sí, entre otros.

6.3. Requerimientos dotacionales

La dotación es un punto muy importante en términos de costos mina, los cuales, con un requerimiento menor, además de la posibilidad de atención a múltiples equipos a la vez, permite que los costos mina se estabilicen, y sea posible prescindir del costeo de una mayor cantidad de operadores respecto al caso manual en términos salariales y de campamentos, por ejemplo. Así, considerando que el personal de supervisión tendrá una **reconversión** en sus cargos, no se considera un adicional en la dotación respecto a los valores actuales, pero los operadores de perforadora si se verán disminuidos en gran parte, disminuyendo así su requerimiento máximo de 40 operadores, a un máximo de 14 en los escenarios de las PV271 y PV351, con una disminución del **65%** en la dotación total de operadores, donde, en primera instancia, deba existir un programa que permita reposicionar a los 26 operadores restantes según su plan de carrera, competencias, años antigüedad para revisar potenciales planes de retiro, entre otros, de manera de que la implementación de la tecnología sea una solución para la mayor parte de las personas que interactúan con el entorno asociado a la faena minera.

6.4. Waterfall de autonomía

Una manera de representar gráficamente la influencia económica de incorporar la autonomía, y en general de los cambios que puedan resultar significativos a la hora de comparar el valor de una modificación al caso base correspondiente al año en curso, ya sea por recambio de flota, incorporación de tecnología, mejoras operacionales, entre otros. Es así que el incorporar la tecnología autónoma, si bien con la información que se cuenta no compara directamente la influencia global al Valor Actual Neto de la operación entrega líneas directas de la diferencia entre el caso manual y los respectivos escenarios de implementación. Así, en las figuras Figura 32 y Figura 33 se representan los waterfall de implementación de autonomía para perforadoras PV271 y PV351 con una tasa de descuento del 8% para poder ser representados dentro del Valor Presente del ejercicio.

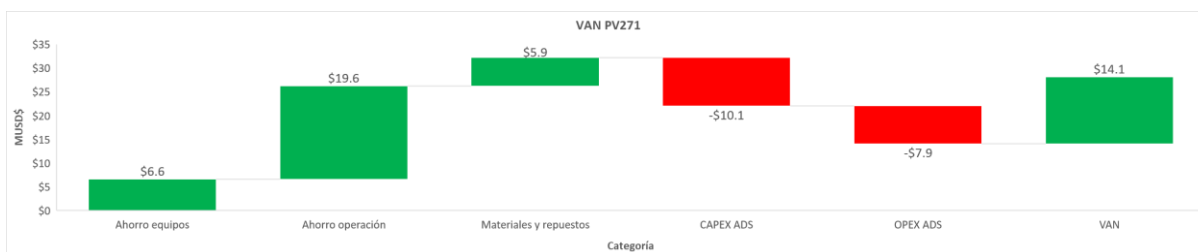


Figura 32. Waterfall asociado a PV271 autónoma.

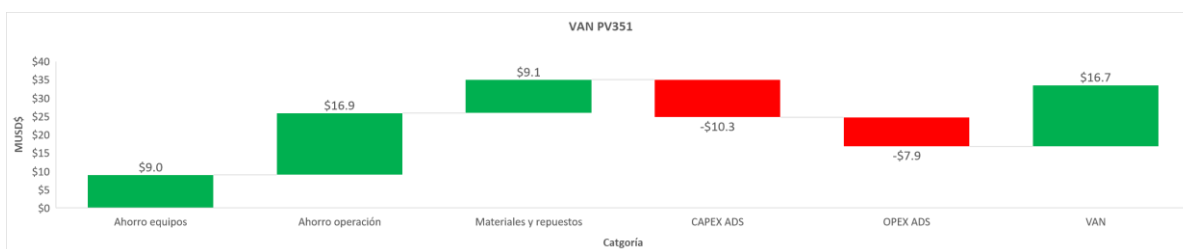


Figura 33. Waterfall asociado a PV351 autónoma.

Las categorías respectivas se asociaron en grupos que engloban diversos inputs que se verán afectados o beneficiados según corresponda con la implementación de la tecnología autónoma, así, los 5 grupos mencionados toman las siguientes consideraciones:

- Ahorro equipos:** corresponde al ahorro de invertir en la determinada cantidad de equipos según sea el caso, considerando un costo de la perforadora PV271 contempla un costo de \$3,300,000 USD; mientras que la PV351 con su mayor capacidad de perforación y dimensiones, un costo de \$4,000,000 USD. Tal como se mencionó anteriormente, en el escenario de PV271 existe un ahorro neto de 2 equipos, mientras que, en el caso de la PV351, se consideró la diferencia en el costo de invertir en **10** PV271 versus **6** PV351.
- Ahorro operación:** el costo de operación con operador en el caso de las perforadoras PV271 autónomas se reduce significativamente por las razones que anteriormente se han levantado, por ejemplo, un menor requerimiento de personal por equipo, menor frecuencia de falla de los componentes mayores, mayor eficiencia en el ciclo de perforación y un mayor rendimiento, el cual a la larga abarata los costos en general. Como se expone en el gráfico, el ahorro de la PV271 autónomas se considera de 19,6 MUSD\$, mientras que el ahorro de operar con PV351 autónomas corresponde a 16,9 MUSD\$, ambos casos respecto al caso de comparación de las PV271 manuales.
- Materiales y repuestos:** Al vectorizar los costos de mantenimiento anuales de ambos modelos (\$250,000; \$200,000 y \$212,500 para la PV271 manual y autónoma, además de la PV351 respectivamente), los costos de mantenimiento se expresan en la Tabla 22.

Tabla 22. Costo total de mantenimiento por modelo.

Equipo	Costo total mantenimiento MUSD\$
PV 271 Manual	45.6
PV 271 Autónoma	35.0
PV 351 Autónoma	27.8

Resultando así en un ahorro para ambos casos, de \$5.9 MUSD y \$9.1 MUSD actualizados para la PV271 y PV351 respectivamente.

- **CAPEX y OPEX ADS:** Como se expresó en las Figura 29 y Figura 30, los costos de la tecnología se han vectorizado según el requerimiento total de equipos año a año, además de los costos asociados al sitio de operación. Estos costos son referenciales para proveedores con vasta experiencia en la tecnología, a sabiendas de la presencia de otros proveedores con condiciones agnósticas que permitirían abaratar costos, a expensas de aumentar el riesgo de implementar la tecnología en áreas como:

- Soporte
- Repuestos críticos
- Personal en sitio
- Aseguramiento de performance

Así, finalmente, en ambos casos se observa un **VAN positivo** de **14.1 y 16.7 MUSD\$** para la PV271 y PV 351 respectivamente, lo cual permitiría que, al largo plazo, el insertar la tecnología permita un beneficio económico. De igual manera, se debe destacar que, tal como se mencionó anteriormente, al tener en frente indicadores menores que en relación a faenas que cuentan con estándares de operación deseables para la operación manual, la valorización del VAN del proyecto de autonomía versus el caso de perforación manual se podría considerar en ciertos aspectos optimista.

7. Conclusiones y recomendaciones

Las perforadoras autónomas son una innovación tecnológica que es una mejora al proceso de perforación convencional. La gran diferencia entre los equipos de perforación manuales y autónomos es la capacidad de perforar una larga secuencia de pozos, incluyendo la perforación y el traslado de manera segura, precisa y sin la necesidad de un operador a bordo.

La tecnología de autonomía de perforadoras requiere de estándares y condiciones para operar y permitir que un operador controle y supervise a distancia hasta tres perforadoras de manera simultánea. Además de tener un beneficio de seguridad al sacar al operador de la línea de fuego, lo anterior ayuda a reducir significativamente las demoras generadas por traslados del operador hacia el equipo, como el cambio de turno y los tiempos de colación. Es importante destacar que el aumento de rendimientos está también asociado a una reducción de la re-perforación de pozos que se realiza en la perforación convencional. La precisión del sistema y la automatización de la realización de pozos hace que las perforaciones se logren con una mejor adherencia al plan de perforación en ubicación y largo de pozos, lo que se traduce en mejores rendimientos y estándares respecto al logro de la malla de perforación.

Con la incorporación de la autonomía, la disponibilidad aumenta levemente por un menor abuso operacional de la máquina en el largo plazo, la utilización del equipo mejora y el rendimiento mejora por la menor necesidad de re-perforación. Al dimensionar la flota de perforadoras en el caso estudio se lograron reducir desde 10 perforadoras PV271 a 8 PV271 con autonomía y a 6 PV351 con autonomía. Esta diferencia que se debe a lo explicado anteriormente: a una mayor capacidad de perforación y tonelaje tronado por pozo. De lo anterior se puede concluir que la productividad de la flota tiene un aumento calculado del 20% para el caso de las PV271 (mismo modelo en su modalidad autónoma) y un 40% para las PV351 respecto al máximo de la flota.

El ahorro de equipos de perforación no siempre será posible y dependerá de los tamaños de flota y el requerimiento de frentes simultáneas de explotación de cada mina. A mayor tamaño de flota, aumenta la posibilidad de ahorro de equipos con mayor utilización.

La principal palanca para mejores productividades es que la utilización de las perforadoras autónomas es mayor que las convencionales. Este aumento de utilización no es automático. La disponibilidad de patio para perforar y el ritmo de carguío cumpliendo la línea de programa, es importante para que la flota de perforadoras aumente en utilización. Es decir, la gestión de la supervisión para lograr aumentar la utilización de los equipos es importante para mejorar resultados (gestión de cambio).

La metodología utilizada en esta evaluación consideró para el dimensionamiento de flota de perforadoras y la comparación técnico-económica valores referenciales e indicadores del plan de producción de la mina ejemplo, los que pueden considerarse como poco exigentes para el caso de perforación manual. Por parte de la autonomía, los indicadores utilizados pueden considerarse como buenos, pero con oportunidades de mejorar en el caso autónomo. De acuerdo con lo anterior, los resultados obtenidos pueden ser algo optimistas respecto a la valorización del VAN del proyecto de autonomía versus el caso de perforación manual.

Para la metodología utilizada no se consideraron los posibles riesgos asociados a los proyectos de autonomía, los que pueden aumentar los plazos de implementación o incluso aumentar los costos considerados en el caso base, por lo que la valorización realizada puede considerarse que no incluye correcciones por riesgos.

A pesar de sus muchas ventajas, las perforadoras autónomas aún enfrentan algunos desafíos, como la necesidad de un software avanzado y el requerimiento de una correcta manipulación de este, además del acceso a una red de comunicaciones con su respectiva infraestructura. Otro problema que puede existir corresponde a una mala gestión del cambio para la madurez del uso de la autonomía por parte de quienes resulten ser los operadores designados para dirigir la tecnología o en su defecto el no cumplimiento de los plazos de los respectivos grupos de entrenamiento que deban realizarse para madurar los nuevos roles autónomos.

Respecto a los costos de operación e inversión requerida para operar, la perforación autónoma puede generar ahorros en la compra de equipos, ahorros en la operación por un requerimiento menor de personal y mejores productividades por equipo. Además, se estima que los costos de materiales y repuestos serían menores por una reducción de abusos operacionales y una perforación más en línea con los parámetros de perforación adecuados.

La perforación autónoma requiere una inversión adicional en kits, software, hardware adicionales y una red de comunicaciones para su operación. Para el caso en estudio, el VAN es positivo para el caso de autonomía versus el caso manual, lo que puede variar o incluso puede llegar a ser negativo en el caso de la automatización de pocos equipos. Sin embargo, es importante también considerar los beneficios intangibles de seguridad a las personas o los mejores estándares de perforación asociados a la perforación autónoma.

A lo largo de la presente memoria, se abordaron diversos tópicos con principal énfasis en

Por otra parte, respecto a las recomendaciones que se entregan a la hora de implementar la perforación autónoma en una mina a rajo abierto, a grandes rasgos, se identifican las siguientes:

- **Evaluación del terreno:** Antes de implementar la perforación autónoma, es necesario llevar a cabo una evaluación detallada del terreno para identificar las posibles limitaciones y riesgos asociados al uso de esta tecnología en la mina.
- **Selección de la maquinaria adecuada:** La elección de la maquinaria adecuada para la perforación autónoma dependerá del tamaño y tipo de la mina, así como de las características del terreno. Se deben seleccionar equipos que cumplan con las normas de seguridad y estén diseñados para trabajar en condiciones extremas además de cumplir con los requerimientos mínimos de los proveedores de la tecnología para llevar a cabo la conversión de los equipos.
- **Formación del personal:** Es importante que todo el personal que estará involucrado en la operación de la perforación autónoma reciba una formación adecuada. Esto incluye a los operadores, técnicos y supervisores, quienes deben estar capacitados para manejar la tecnología y tomar decisiones en caso de emergencias de la mejor manera.
- **Implementación gradual:** Se recomienda implementar la perforación autónoma de forma gradual, comenzando con pequeñas secciones de la mina. Esto permitirá identificar posibles problemas y ajustar el sistema antes de implementarlo a gran escala comprometiendo la operación y producción de planta.
- **Monitoreo continuo:** Es necesario llevar a cabo un monitoreo continuo del sistema de perforación autónoma para detectar cualquier problema o mal funcionamiento. Se deben establecer protocolos de seguridad para abordar rápidamente cualquier problema que se presente.
- **Mantenimiento preventivo:** Es fundamental llevar a cabo un mantenimiento preventivo regular de los equipos de perforación autónoma para garantizar su buen funcionamiento y prolongar su vida útil, tal como lo levanta la promesa de valor de esta tecnología.
- **Actualización tecnológica:** La tecnología de perforación autónoma está en constante evolución, por lo que se recomienda estar al tanto de las últimas novedades y actualizar el sistema regularmente para mejorar su rendimiento y seguridad con un permanente acompañamiento del proveedor de la tecnología.

8. Referencias

1. Futuro, M. Y. (2021, 14 diciembre). *Seguridad Y Eficiencia: Las Ventajas De Las Perforadoras Autónomas* | *Minería Y Futuro*. Minería y Futuro. <https://www.mineriyfuturo.cl/noticias/seguridad-y-eficiencia-las-ventajas-de-las-perforadoras-autonomas/>
2. *Energía en Minería | Perforación*. (2021). <https://www.energiaenmineria.cl/procesos/perforacion/>
3. *Energía en Minería | Incorporación de Perforadoras autónomas*. (s. f.). <https://www.energiaenmineria.cl/proyectos-implementados/incorporacion-de-perforadoras-autonomas/>
4. *Pit Viper drilling for Africa's iron* - Mining & Construction online. (2013, 19 marzo). Mining&Construction. <https://miningandconstruction.com/mining/pit-viper-drilling-for-africas-iron-2227/>
5. *Automatización y Autonomía: ¿Cuál es la Diferencia?* (s. f.). https://www.cat.com/es_MX/articles/ci-articles/automation-autonomy-whats-the-difference.html. https://www.cat.com/es_MX/articles/ci-articles/automation-autonomy-whats-the-difference.html
6. AngloAmerican Perú. (2022). *Perforadoras autónomas para operaciones más seguras*. Angloamerican Perú. <https://peru.angloamerican.com/es-es/innovacion/future-smart-mining/perforadoras-autonomas-para-operaciones-mas-seguras>
7. Tellus Mining. (2022). Estudio de ingeniería: Trade off Perforadoras Autónomas.
8. RADWIN. (2022, 7 septiembre). *Digital Mining | Wireless solutions for mine site communication*. <https://radwin.com/digital-mining-old/>
9. Minero, P. R. (2020, 21 julio). *Minera Los Pelambres, primera operación minera con equipos de perforación autónomos*. Reporte Minero | El portal de minería en Chile. <https://www.reporteminero.cl/noticia/reportajes/2020/07/minera-los-pelambres-primera-operacion-minera-con-equipos-de-perforacion-autonomos>
10. Epiroc (2016). *Impulsado por la automatización*. Epiroc. <https://www.epiroc.com/es-cl/customer-stories/2016/powered-by-automation-pit-viper>
11. *Sandvik launches AutoMine® Surface Drilling AutoCycle for fully autonomous surface drilling fleet operation*. (2021). Sandvik Mining and Rock Technology. <https://www.rocktechnology.sandvik/en/news-and-media/news-archive/2021/09/sandvik-launches-automine-surface-drilling-autocycle-for-fully-autonomous-surface-drilling-fleet-operation/>
12. Revista Tecnología Minera. (2021, 18 junio). Sandvik agrega operación completamente autónoma a la perforadora de barrenos Leopard DTH.

- Tecnologiaminera*. <https://tecnologiaminera.com/noticia/sandvik-agrega-operacion-completamente-autonoma-a-la-perforadora-de-barrenos-leopard-dth-1624057203>
13. *Seguridad y productividad, las ventajas del cambio a perforadoras autónomas*. (2021, 11 diciembre). CNN Chile. https://www.cnnchile.com/m360/perforadoras-autonomas-seguridad-productividad_20211211/
14. Gleeson, D. (2023, 9 marzo). *autonomous drilling Archives*. International Mining. <https://im-mining.com/tag/autonomous-drilling/>