

**UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN**

**Facultad de Ingeniería**

**Escuela Profesional de Ingeniería de Minas**

**INCREMENTO DE LA VIDA ÚTIL DE LOS ACEROS DE PERFORACIÓN PARA EL  
AUMENTO DE RENDIMIENTO PERORACIÓN EN FRENTES DE AVANCE DE  
UNA MINA SUBTERRÁNEA EN EL DISTRITO DE PARCOY, PROVINCIA DE  
PATAZ - LA LIBERTAD 2023**

**TESIS**

Presentada por:

**JAIME ALBERTO RAMOS RIVERA**

Para optar el Título Profesional de:

**INGENIERO DE MINAS**

**TACNA - PERÚ**

**2025**

**UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN**

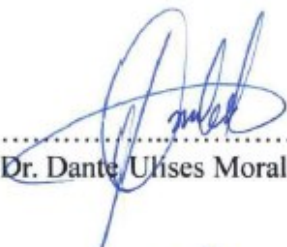
**Facultad de Ingeniería**

Escuela profesional de Ingeniería de Minas

**INCREMENTO DE LA VIDA ÚTIL DE LOS ACEROS DE PERFORACIÓN  
PARA EL AUMENTO DE RENDIMIENTO DE PERFORACIÓN EN  
FRENTE DE AVANCE DE UNA MINA SUBTERRÁNEA EN  
EL DISTRITO DE PARCOY, PROVINCIA DE  
PATAZ - LA LIBERTAD 2023**

Tesis sustentada y aprobada el 16 de abril de 2025; estando el Jurado Calificador  
integrado por:

PRESIDENTE

  
.....  
Dr. Dante Ulises Morales Cabrera

1er. MIEMBRO  
(SECRETARIO)

  
.....  
Dr. Julio Miguel Fernández Prado

2do. MIEMBRO  
(VOCAL)

  
.....  
Dr. Jorge José Segura Dávila

ASESOR:

  
.....  
Dr. Jorge José Segura Dávila

## CERTIFICADO DE SIMILITUD

Yo, **Dr. Jorge José Segura Dávila**, en mi condición de asesor acreditado por la Resolución de Facultad N° 08033-2023-FAIN/UNJBG, de la tesis titulada:


**"INCREMENTO DE LA VIDA ÚTIL DE LOS ACEROS DE PERFORACIÓN PARA EL AUMENTO DE RENDIMIENTO DE PERFORACIÓN EN FRENTE DE AVANCE DE UNA MINA SUBTERRÁNEA EN EL DISTRITO DE PARCOY, PROVINCIA DE PATAZ - LA LIBERTAD 2023"**.

Presentado por el Bachiller Jaime Alberto Ramos Rivera, para optar el título profesional de Ingeniero de Minas

Habiendo cumplido con lo establecido en el reglamento de originalidad y de similitud de trabajo de investigación y producción intelectual, considerando que según la revisión, evaluación y análisis realizado a través del software de similitud textual TURNITIN, cuenta con el nivel de similitud permitido cuyo porcentaje es 04%.

Por lo que **CERTIFICO LA SIMILARIDAD** de la tesis enunciada líneas arriba, la cual está expedita para continuar con los trámites para la obtención de título profesional, según corresponda consiguientemente la publicación en el repositorio institucional.

FIRMA DEL ASESOR  
Nombres y Apellidos

  
.....  
Dr. Jorge José Segura Dávila  
ORCID: 0009-0005-4711-6371  
DNI N°: 00505290



FIRMA TESISTA  
Nombres y Apellidos

  
.....  
Sr. Jaime Alberto Ramos Rivera  
DNI N°: 71570152



## **Dedicatoria**

A Dios, por ser mi guía constante, por darme fuerzas en los momentos difíciles y por acompañarme en cada paso de este camino.

A mi padre, por su amor incondicional desde el cielo. A mi madre por su sacrificio y por enseñarme el valor del esfuerzo y la perseverancia. Este logro es tanto mío como de ellos.

A mis amigos, por su compañía sincera, por estar presentes en los momentos buenos y también en los difíciles.

Y a todos los que, de una u otra forma, fueron parte de esta etapa: gracias por ayudarme a hacerla posible.

## **Agradecimientos**

En primer lugar, agradezco a Dios, por darme la fortaleza, salud y sabiduría necesarias para superar cada desafío durante este proceso.

A mis padres y familia, por su amor incondicional, apoyo moral y constante motivación. Gracias por ser mi sostén en cada momento de dificultad.

A la universidad y a la facultad, por brindarme la formación académica necesaria y los recursos para llevar a cabo esta investigación.

A mis amigos y compañeros, por su apoyo, colaboración y por compartir conmigo esta etapa de esfuerzo y aprendizaje.

## CONTENIDO

Dedicatoria .....	iv
Agradecimientos .....	v
Resumen.....	xii
Abstract .....	xiii
Introducción .....	1
Capítulo I: Planteamiento del Problema .....	3
1.1. Antecedentes del problema a investigar.....	3
1.2. Descripción del problema.....	4
1.3. Formulación del problema .....	5
1.3.1. Problema general.....	5
1.3.2. Problemas específicos .....	5
1.4. Objetivos de la investigación .....	6
1.4.1. Objetivo general .....	6
1.4.2. Objetivos específicos.....	6
1.5. Justificación e importancia de la investigación.....	7
1.5.1. Justificación práctica .....	7
1.5.2. Justificación metodológica.....	7
1.6. Limitaciones .....	7
1.6.1. Temporal.....	7
1.6.2. Espacial .....	8

1.6.3. Unidad de estudio.....	8
1.7. Viabilidad del estudio.....	8
1.8. Formulación de hipótesis .....	9
1.8.1. Hipótesis general.....	9
1.8.2. Hipótesis específicas .....	9
1.9. Variables.....	9
1.9.1. Variable independiente .....	9
1.9.2. Variable dependiente .....	10
1.10.Operacionalización de variables.....	10
Capítulo II: Marco Teórico.....	12
2.1. Antecedentes .....	12
2.1.1. Nacionales .....	12
2.1.2. Internacionales .....	14
2.2. Bases teóricas .....	16
2.2.1. Perforación en minería subterránea.....	16
2.2.2. Aceros de perforación en minería .....	25
2.2.3. Factores que Afectan la Vida Útil de los Aceros de Perforación.....	30
2.3. Definiciones conceptuales.....	39
2.3.1. Macizo rocoso .....	39
2.3.2. Perforación y voladura .....	39
2.3.3. Operación minera .....	39

2.3.4. Rendimiento .....	40
2.3.5. Frentes de avance .....	40
2.3.6. Optimización .....	40
2.3.7. Productividad .....	41
2.3.8. Perforabilidad .....	41
Capítulo III: Marco Metodológico .....	42
3.1. Planteamiento metodológico .....	42
3.2. Población y muestra .....	42
3.3. Equipos y materiales .....	43
3.4. Procedimiento de las pruebas experimentales.....	44
3.5. Técnicas de recolección de datos .....	45
3.6. Técnicas para el procesamiento de datos .....	46
Capítulo IV: Resultados .....	47
4.1. Descripción de las pruebas experimentales.....	47
4.2. Presentación y análisis de los resultados.....	60
4.3. Contrastación de hipótesis.....	80
Capítulo V: Discusiones .....	88
5.1. Pruebas de validación del modelo experimental .....	88
5.2. Aplicación de la tecnología encontrada.....	88
5.3. Contraste con trabajos de investigación similares.....	89
Conclusiones .....	90

Recomendaciones.....	92
Referencias Bibliográficas .....	93
Anexos.....	99

## Índice de Tablas

Tabla 1 Operacionalización de variables.....	11
Tabla 2 Población y muestra .....	43
Tabla 3 Parámetros de la sección de avance 8'x9' .....	47
Tabla 4 Malla para sección.....	51
Tabla 5 Plan minero - avances lineales (m) .....	61
Tabla 6 Ejecutado - avances lineales (m).....	63
Tabla 7 Vida útil de brocas de perforación sin optimización .....	68
Tabla 8 Vida útil de brocas de perforación optimizado.....	69
Tabla 9 Pies perforados según plan minero.....	72
Tabla 10 Ahorro proyectado en brocas de perforación .....	75
Tabla 11 Resultados de la prueba .....	83
Tabla 12 Tabla T Student 1 Cola .....	85
Tabla 13 Tabla T Student Área de dos colas .....	86

## Índice de Figuras

Figura 1 Diseño de malla para una sección de 8'x 9' .....	51
Figura 2 Relación de desgaste de botones y tasa de penetración.....	54
Figura 3 Desgaste acelerado de la broca, con respecto a una nueva.....	55
Figura 4 Análisis de causa efecto diagrama Ishikawa de la vida útil de aceros de perforación .....	56
Figura 5 Gráfica del plan minero hasta fines del año 2023.....	62
Figura 6 Gráfica de los avances ejecutados .....	63
Figura 7 Avances lineales Ejecutado junto con lo planeado .....	65
Figura 8 Gráfica de la vida útil de las muestras .....	70
Figura 9 Gráfica de la cantidad de brocas a utilizarse .....	73
Figura 10 Grafica de la cantidad de barras a utilizarse .....	78
Figura 11 Gráfica del ahorro en cada mes.....	79
Figura 12 Análisis de datos en Excel para prueba t para dos muestras suponiendo varianzas iguales .....	81
Figura 13 Definición de variables .....	82

## Resumen

La perforación en minería subterránea influye directamente en la eficiencia y en los costos de producción. En la región La Libertad se detectó una reducción en el avance lineal por disparo, lo que generó sobrecostos y retrasos. Esta investigación tuvo como objetivo incrementar la vida útil de los aceros de perforación para mejorar el rendimiento en frentes de avance.

Se analizaron 15 brocas de perforación, comparando su desempeño antes y después de aplicar prácticas de optimización como el reacondicionamiento de botones, el ajuste de la presión de perforación y el mantenimiento preventivo.

Los resultados evidencian un incremento en la longitud perforada y la eficiencia operativa, así como una reducción en el consumo de brocas y costos asociados.

En conclusión, la aplicación de medidas de control y mantenimiento mejora el rendimiento en frentes de avance, prolonga la vida útil de los aceros de perforación y contribuye a la sostenibilidad de las operaciones mineras.

**Palabras clave:** Minería subterránea, perforación, aceros de perforación, vida útil, optimización, mantenimiento preventivo.

## **Abstract**

Drilling in underground mining directly impacts efficiency and production costs. In the La Libertad region, a decrease in linear advance per blast was identified, generating cost overruns and delays. This research aimed to extend the useful life of drilling steels in order to improve performance in development headings.

A total of 15 drill bits were analyzed, comparing their performance before and after the implementation of optimization practices such as button reconditioning, adjustment of drilling pressure, and preventive maintenance.

The results show a notable increase in drilled length and operational efficiency, along with a reduction in drill bit consumption and related costs.

In conclusion, the application of control and maintenance measures improves performance in development headings, extends the service life of drilling steels, and contributes to the sustainability of underground mining operations.

**Keywords:** Underground mining, drilling, drilling steels, useful life, optimization, preventive maintenance.

## **Introducción**

En la industria minera, la perforación constituye un proceso esencial que incide directamente en la eficiencia operativa y en los costos de producción. En la región de La Libertad se ha evidenciado una disminución del avance lineal por disparo en frentes de avance subterráneos, lo cual genera sobrecostos y retrasos en planta. Ante esta situación, la presente investigación se centra en evaluar la vida útil de los aceros de perforación, analizando el desempeño de 15 brocas antes y después de aplicar prácticas de optimización, como el reacondicionamiento de botones y la gestión adecuada de la presión de perforación. Los resultados obtenidos muestran un incremento significativo en la longitud perforada tras la optimización, confirmando la eficacia de medidas de mantenimiento preventivo y de control operacional. Este estudio busca aportar directrices técnicas que permitan mejorar el rendimiento de perforación, reducir costos y contribuir a la sostenibilidad de las operaciones mineras subterráneas.

En el Capítulo I se presenta el planteamiento del problema en torno a la reducción del avance lineal y los sobrecostos en mina, sustentado en antecedentes nacionales e internacionales; además, se formulan los objetivos, hipótesis y variables.

En el Capítulo II se desarrolla el marco teórico, donde se analizan los fundamentos de la perforación en minería subterránea, las características de los

aceros de perforación, los factores que influyen en su desgaste, así como los estudios previos relacionados con la optimización de su vida útil. que guiarán la investigación.

En el Capítulo III se describe la metodología aplicada, detallando la población y muestra conformada por 15 brocas de perforación, junto con los procedimientos experimentales, la recolección de datos y las técnicas de análisis empleadas en los frentes de avance.

En el Capítulo IV se presentan los resultados obtenidos al comparar la vida útil de las brocas antes y después de la optimización, evidenciando los avances lineales alcanzados, el ahorro en costos y la validación estadística de las hipótesis planteadas.

Finalmente, en el Capítulo V se discuten los hallazgos de la investigación, lo que permite validar la efectividad de las medidas de optimización implementadas; este capítulo concluye con las recomendaciones orientadas a mejorar la eficiencia y sostenibilidad del proceso de perforación en minas subterráneas.

## **Capítulo I**

### **Planteamiento del Problema**

#### **1.1. Antecedentes del problema a investigar**

Una de las actividades extractivas que ha impulsado hasta en un 8% el Producto Bruto Interno (PBI) nacional durante la última década es el subsector minero (MINEM, 2023). La producción de los metales por parte de la minería subterránea y superficial están sometidas al precio de los metales del mercado internacional (Quito & Babilonia, 2020), es por ello que la importancia del control de costos operativos es sustancial, así como el cumplimiento de los programas de producción. Durante el último trimestre enero-abril del año 2023, la región de la Libertad generó más de 9.8 millones gramos finos de oro, representando más del 33% de representatividad a nivel nacional (MINEM, 2023)

El cumplimiento de la producción dentro de las unidades mineras se refleja en el incremento de indicadores económicos en el país, es por ello que la ejecución eficiente y eficaz de cada proceso que forma parte de la actividad minera es indispensable. Dentro del proceso de perforación y voladura, el control del rendimiento de las máquinas perforadoras y estados de los aceros de perforación es muy importante, ya que influyen significativamente en los resultados expresados metros de avance por disparo y tonelaje de material fragmentado por metro de avance. Uno de los aspectos más importante a tener en cuenta en la perforación de

frentes de avance en “breasting” y realce es el control y mantenimiento de los aceros de perforación (Aparco & García, 2019)

## **1.2. Descripción del problema**

Dentro de las operaciones de una empresa minera del norte del Perú, se ha percibido una reducción del avance lineal por disparo entre los periodos mayo-junio del año 2023, lo que ha significado un aumento de costos asumidos por la empresa minera y retrasos en el envío de material a la planta de beneficio. Actualmente, se realizan los trabajos de perforación en frentes de avance convencionales a cargo de empresas especializadas, las secciones de dichas labores son en promedio de 2,40 metros de ancho por 2,70 metros de alto, el tipo de roca sobre la que se trabaja es generalmente de tipo III-B y IV-A. Los trabajos de perforación se llevan a cabo con perforadoras manuales JACKLEG con barras de 3 pies, 4 pies y 6 pies y brocas de 38 mm de diámetro. Uno de los principales problemas detectados durante el proceso de perforación es pérdida repentina de brocas en la ejecución de la operación de perforación, lo que generan tiempos muertos por cambio de accesorios, asimismo sucede que se presentan “pechos” tras el proceso de voladura, posiblemente generados por una desviación de taladros por la omisión del uso de guidores, reflejándose así en los reportes de producción los bajos rendimientos en el proceso de perforación. Es por ello que la presente investigación plantea una serie de propuestas que permitan el incremento de la vida útil de los aceros de perforación

para el incremento del rendimiento del proceso de perforación que actualmente se practica por empresas contratistas.

### **1.3. Formulación del problema**

#### **1.3.1. Problema general**

¿Cómo incrementar la vida útil de los aceros de perforación para el aumento del rendimiento de perforación en frentes de avance de una mina subterránea del norte del Perú?

#### **1.3.2. Problemas específicos**

- a) ¿Cómo inciden los factores de mantenimiento de los aceros de perforación en el rendimiento de perforación en los frentes de avance de una mina subterránea del norte del Perú?
- b) ¿Cómo inciden los factores operacionales en el uso de los aceros de perforación en el rendimiento de perforación en los frentes de avance de una mina subterránea del norte del Perú?
- c) ¿Existe relación entre el rendimiento de perforación en los frentes de avance con la implementación de medidas de control y procedimientos de trabajo que incrementen la vida útil de los aceros de perforación?

## **1.4. Objetivos de la investigación**

### **1.4.1. Objetivo general**

Incrementar la vida útil de los aceros de perforación para el aumento del rendimiento de perforación en los frentes de avance de una mina subterránea del norte del Perú.

### **1.4.2. Objetivos específicos**

- a) Determinar la incidencia de los factores de mantenimiento de los aceros de perforación en el rendimiento de perforación en los frentes de avance de una mina subterránea del norte del Perú.
- b) Determinar la incidencia de los factores operacionales en el uso de los aceros de perforación en el rendimiento de perforación en los frentes de avance de una mina subterránea del norte del Perú.
- c) Evaluar el rendimiento de perforación en los frentes de avance con la implementación de medidas de control y procedimientos de trabajo que incrementen la vida útil de los aceros de perforación.

## **1.5. Justificación e importancia de la investigación**

### **1.5.1. Justificación práctica**

La presente investigación es de gran importancia, puesto que logrará demostrar el incremento del rendimiento en la operación de perforación a partir de la implementación de medidas de control y procedimientos de trabajo que incrementen la vida útil de los aceros de perforación sustentado a partir del incremento en metros perforados por hora, incremento de la eficiencia de perforación y el aumento de la producción por metro de avance.

### **1.5.2. Justificación metodológica**

La presente investigación permitirá ser una fuente de consulta para estudios venideros que se realicen de acuerdo a los alcances y objetivos que la presente investigación describe.

## **1.6. Limitaciones**

### **1.6.1. Temporal**

La investigación presenta datos recolectados y analizados a partir de reportes de producción y mantenimiento a partir del 01 junio al 30 setiembre del año 2023.

### **1.6.2. Espacial**

El análisis se encuentra enfocado a la evaluación del uso de los aceros de perforación estrictamente al proceso de perforación y voladura en frentes de avance de una mina subterránea del norte del Perú.

### **1.6.3. Unidad de estudio**

Según Hurtado (2000) la unidad de estudio se refiere al contexto o entidad que resultará ser el objeto de medición y por ende sujeto de interés en la investigación.

La unidad de estudio en la presente investigación son los aceros de perforación (brocas, barras) utilizados por una empresa minera subterránea del norte del Perú para sus operaciones en el proceso de perforación y voladura.

### **1.7. Viabilidad del estudio**

El trabajo de investigación es viable ya que se cuenta con el compromiso y disponibilidad de tiempo del investigador el cual cuenta con los recursos para realizar la investigación.

## **1.8. Formulación de hipótesis**

### **1.8.1. Hipótesis general**

El incremento de la vida útil de los aceros de perforación aumenta del rendimiento de perforación en los frentes de avance de una mina subterránea del norte del Perú

### **1.8.2. Hipótesis específicas**

- a) Los factores de mantenimiento de los aceros de perforación inciden en el rendimiento de perforación en los frentes de avance de una mina subterránea del norte del Perú.
- b) Los factores operacionales en el uso de los aceros de perforación inciden en el rendimiento de perforación en los frentes de avance de una mina subterránea del norte del Perú
- c) El rendimiento de perforación en los frentes de avance aumenta con la implementación de medidas de control y procedimientos de trabajo que incrementen la vida útil de los aceros de perforación.

## **1.9. Variables**

### **1.9.1. Variable independiente**

X: Vida útil de los aceros de perforación.

### **1.9.2. Variable dependiente**

Y: Rendimiento de perforación en frentes de avance.

### **1.10. Operacionalización de variables**

**Tabla 1**

## Operacionalización de variables

Tipo de variable	Nombre de la variable	Definición operacional	Dimensiones	Indicadores
Independiente	Vida útil de los aceros de perforación	Se refiere a los metros perforados de cada accesorio que conforma la sarta o columna de perforación, evaluando el control y procedimiento de la operación de perforación. (Quito & Babilonia, 2020)	Rendimiento de aceros	-Metros perforados por cantidad de aceros (broca, shank, barra, coupling)
	Rendimiento de perforación en frentes de avance	Se refiere a los indicadores de rendimiento resultante de la perforación con equipos y uso de aceros de perforación dentro de una escala de tiempo (Camarena, 2019).	Rendimiento de perforación  Producción en frentes de avance	Velocidad de perforación (m/h) Eficiencia de perforación (%) Desviación de taladros (%) Metros lineales por mes (m/mes) Metros de avance por disparo (m/disparo)

## **Capítulo II**

### **Marco Teórico**

#### **2.1. Antecedentes**

##### **2.1.1. Nacionales**

Aparco y García (2019) en su tesis titulada: Optimización de la vida útil de los aceros de perforación para la reducción de costos en mina San Vicente - Cía. San Ignacio de Morococha S.A.A. año 2018 tuvo como objetivo estudiar aquella relación existente ante el uso correcto y las actividades mejoradas en los procesos mineros; de tal modo la metodología planteada está basada en un método científico, inductivo, deductivo e hipotético; como lo es la recolección de datos, los procesos, las contrastaciones de hipótesis, investigación de campo y un análisis sobre el consumo de acero en perforaciones mineras. Los niveles de confiabilidad fueron medidos por el estadístico alfa de Cronbach al 83% y estadístico de Pearson. Como resultado, los autores concluyeron que la optimización de la vida útil de aceros en perforaciones influye directamente en la reducción de costos de la Minera San Vicente, con una intensidad de  $r$  al 67% y probabilidad  $p$  del  $0,0 < 0,05$ .

Quito y Babilonia (2020) en su tesis titulada: Análisis de la vida útil de aceros de perforación para evaluar costos operativos en galerías Compañía Minera San Cristóbal S.A.A., analizaron las variables técnicas del equipo Vómer y su

influencia sobre los valores operativos en las perforaciones. La optimización del rendimiento del acero en la perforación de nivel 1120 fue verificada por los autores en términos de rendimiento anual y mensual; además de, aspectos económicos que oscilaron los \$383,27 mensuales. Los resultados probaron que la velocidad de la perforación tiene relación con el filo de la broca; habiendo una demora en operación por brocas desgastadas.

Zapana (2022) en su tesis titulada: Influencia de los factores técnicos - operacionales en el rendimiento de los aceros de perforación usados en las labores de desarrollo en la Unidad Minera Huancapeti desarrollada en Cusco, resaltó el determinar cómo los factores técnicos operacionales influyen en el productividad de los aceros de perforación en una minera situada en Huancapeti. El estudio adoptó un enfoque aplicado, con un alcance correlacional y no experimental. El autor obtuvo como resultado un coeficiente de correlación positivo de 0,26, indicando una predominio positivo entre los factores técnicos operacionales y la productividad de los aceros de perforación, de esta manera se entiende que los niveles operativos y beneficios económicos pueden ser aún más eficientes considerando las variables.

Sánchez (2022) en su tesis titulada: Optimización de brocas de perforación en el cruce 746, para reducir costos operativos en la mina Coriloma - Apurímac-2019, tuvo como objetivo determinar la optimización de brocas en el proceso de perforación y de esta manera minimizar los costos de operación de la minera; para

ello se realizó pruebas de campo en ambas brocas (Rock bit), cuyos costos oscilaron entre 0,206 \$/m y 0,367 \$/m.

### **2.1.2. Internacionales**

García (2016) en su tesis titulada: Daño a las barrenas, su implicación en la perforación y soluciones propuestas, se enfocó al tipo de barrenas empleadas en la industria petrolera, describiendo sus características físicas y especificaciones; los parámetros operacionales en perforaciones WOB, RPM, torque, arrastre, gastos de lodos, comportamiento de la barrena, entre otros. La metodología utilizada constó en la metodología de la energía específica, Warren modificado y esfuerzo no confinado (UCS). Los resultados obtenidos determinaron que a menor esfuerzo no confinado mayor será la tasa de penetración, de esta forma la selección de barrena consta en modificar los métodos existentes y garantizar una optima operación.

Díaz y Gómez (2018) en su tesis titulada: Evaluación técnica y financiera del mejoramiento en la calidad del hueco mediante la implementación de brocas con calibre extendido en la fase de 12 ¼" en el campo Castilla, evaluaron la técnica y económicamente la optimización de la calidad del hueco en la sección de 12 ¼" en el Campo Castilla, por medio de la implementación en brocas de calibre extendido. El estudio se divide en 3 componentes: geológicos, técnicos y financieros. En lo geológico, se aborda una cuenca sedimentaria y las diferentes unidades litológicas existentes; además, se lleva a cabo una descripción de la

formación mineralógica que es esencial para posteriores análisis; se proporciona información sobre la ubicación del campo y las rutas de acceso, tanto terrestres como aéreas. En cuanto al componente técnico, se describen las brocas utilizadas anteriormente y se examinan las operaciones y eventos sucedidos después de la adición de brocas policristalinas de 2,5" y 4". Por último, el componente financiero se centra en analizar los costos y beneficios relacionados con la implementación de las nuevas brocas con calibre extendido.

González (2016) en su tesis titulada: Evaluación de los parámetros de perforación en barrenos y correlación con la geología del terreno, Investigó la conexión entre los factores de perforación y la geología de un área determinada, de esta manera predecir etapas ulteriores de óptimas voladuras con el fin de minimizar los daños en el macizo y maximizar la eficiencia. Como resultados, el autor concluyó que las variaciones los parámetros proporcionaron gran cantidad de información para conjeturar las características del área, los costos de exploración son despreciables; sin embargo, los costos de obtención de equipos, licencia, análisis de datos y la calibración de equipos duplicaron los costos.

## **2.2. Bases teóricas**

### **2.2.1. Perforación en minería subterránea**

#### **2.2.1.1. Proceso de perforación**

El proceso de perforación en minería subterránea es aplicado mediante perforadoras manuales y/o el montaje de equipos especializados para la perforación en determinadas condiciones de trabajo. A continuación, se presentan una breve descripción de las máquinas y equipos utilizados generalmente en minería. En este contexto, optimizar la eficiencia de este proceso es esencial. Los aceros de perforación juegan un papel clave al enfrentar condiciones extremas de carga, abrasión y corrosión. El enfoque en alargar su vida útil implica desarrollar materiales más resistentes y técnicas de manejo adecuadas. Esto impacta directamente en el rendimiento de la perforación en minas del norte de Perú, mejorando la productividad y seguridad en la industria minera (Ricse, 2020).

#### **a) Perforadoras manuales**

Las perforadoras manuales como el "Jack Hammer" y el "Jack Leg" son esenciales en la minería subterránea al permitir perforar rocas de manera precisa. El "Jack Hammer" fragmenta la roca con impactos repetidos, mientras que el "Jack Leg" es versátil al adaptarse a diferentes posiciones para perforar en condiciones específicas (Ricse, 2020).

### **Jack Hammer**

Es una perforadora usada para construcción de piques, perforación vertical o inclinada hacia abajo. Los aceros de perforación enfrentan desafíos extremos debido a la carga, abrasión y corrosión en la minería subterránea. Su resistencia y durabilidad son cruciales para la seguridad y eficacia de las perforaciones, ya que su deterioro puede causar retrasos y riesgos laborales (Ricse, 2020).

### **Jack Leg**

Es una perforadora usada construcción de rampas, galerías, subniveles, perforación de taladros horizontales e inclinados. Mejorar la vida útil de los aceros de perforación implica investigar materiales resistentes y técnicas avanzadas de fabricación. Mantenimiento adecuado y tecnologías de monitoreo en tiempo real también son esenciales para maximizar la durabilidad de los aceros en operaciones mineras, asegurando la continuidad y eficiencia (Ricse, 2020).

### **Stoper**

Es una perforadora que se emplea para la construcción de chimeneas, perforación vertical hacia arriba. Incrementar la vida útil de los aceros de perforación tiene un impacto directo en la continuidad operativa y la seguridad en la minería subterránea. Aceros más duraderos reducen interrupciones por mantenimiento, mejorando la productividad, y al mismo tiempo, minimizan los

riesgos laborales al mantener equipos íntegros y prevenir accidentes asociados al desgaste prematuro. En resumen, optimizar los aceros beneficia tanto la eficiencia como la seguridad en este sector (Ricse, 2020).

#### **b) Equipos de perforación**

En la minería subterránea, los equipos de perforación, como los "Jumbos de Perforación", las "Perforadoras de Taladros Largos en Abanico" y las "Perforadoras de Taladros Largos Paralelos", son esenciales para acceder a los recursos minerales. Los "Jumbos de Perforación" trabajan de manera secuencial, las "Perforadoras de Taladros Largos en Abanico" tienen un alcance radial y las "Perforadoras de Taladros Largos Paralelos" ofrecen cobertura uniforme. Estos equipos son vitales para la eficiencia en la minería subterránea (Carvajal et al., 2015).

#### **Jumbos de perforación**

Los jumbos de perforación son herramientas cruciales en la minería subterránea que enfrenta desafíos para aumentar la eficiencia en los frentes de avance. Para prolongar la vida útil de los aceros de perforación en estos equipos, se pueden aplicar enfoques como: Selección de materiales específicos, tecnología de control térmico y monitoreo activo y mantenimiento predictivo (Carvajal et al., 2015).

## **Perforadoras de taladros largos en abanico**

Las perforadoras de taladros largos en abanico son esenciales para crear galerías en la minería subterránea. Para extender la vida útil de los aceros de perforación en este contexto, se pueden considerar estrategias como: Ajuste de parámetros de perforación y mitigación de vibraciones (Carvajal et al., 2015)

## **Perforadoras de taladros largos paralelos**

Las perforadoras de taladros largos paralelos son idóneas para construir túneles en minas subterráneas. Para incrementar la vida útil de los aceros de perforación en estas perforadoras, se pueden aplicar enfoques como: Optimización de la geometría de perforación y sistemas de lubricación avanzados (Carvajal et al., 2015)

### **2.2.1.2. Principios de la perforación rotopercutiva**

#### **2.2.1.2.1. Percusión**

Energía cinética del pistón que transmite el martillo hasta la broca de perforación, a través del varillaje en forma de choque; su desplazamiento se da por una alta velocidad en forma de onda de choque; cuando la onda de impacto llega a la punta de la herramienta de perforación, se transfiere energía que transporta se refleja y retrocede por el varillaje, considerando que los puntos de conexión de las

varillas ocasionan disipación de energía y generación de calor (Famesa Explosivos S.A., 2019).

#### **2.2.1.2.2. Rotación**

La rotación es aquella acción de girar sucesivamente una broca, teniendo el objetivo de perforar una roca; para cada tipo de roca se ejecuta la rotación a una velocidad óptima de rotación que produce detritus de mayor dimensión, aprovechando la superficie libre del hueco que genera este impacto. Los ángulos usados van desde los 80 r/min, ángulo de 10° a 20°, brocas de botones de 51 mm a 89 mm y un ángulo de giro de 5° a 7° (Famesa Explosivos S.A., 2019).

#### **2.2.1.2.3. Empuje**

El empuje es aquella energía producida por mecanismos de impacto del martillo que debe transmitirse a la roca; Por lo tanto, es imperativo que la broca permanezca en contacto constante con el lecho del taladro, consiguiendo la fuerza de empuje suministrada por la moto adecuada según el tipo de roca y la herramienta de perforación utilizada. La falta de suficiente fuerza de empuje afecta negativamente la velocidad de penetración, lo que resulta en un mayor desgaste de las varillas y manguitos, y, por consiguiente, aumenta la pérdida de ajuste del taladro (Famesa Explosivos S.A., 2019).

#### **2.2.1.2.4. Barrido**

El barrido está influenciado por un resultado de perforación eficaz, en el cual el fondo de los taladros se debe mantener limpios y con evacuación consecutiva de los detritos a la mínima formación de esta. El barrido en taladros se realiza con fluidos, sea de aire, agua o espuma; inyectando presión hacia el fondo por medio de orificios centrales de los varillajes y la pared del taladro (Famesa Explosivos S.A., 2019).

Por otro lado, el barrido con aire se trabaja a tajo abierto, en el cual el polvo producido se elimina por captadores, suponiendo una pérdida del rendimiento de 10% a 20% (Famesa Explosivos S.A., 2019).

#### **2.2.1.3. Parámetros de perforación**

##### **2.2.1.3.1. Presión de rotación**

Es la presión aplicada a la broca a medida que gira durante la perforación. La presión de rotación puede variar (40 a 50 bar) dependiendo de la formación geológica y la situación operativa. Proporciona estabilidad y control a la broca durante la perforación, ayudando a evitar problemas como atascos o desviaciones no deseadas del pozo (Herrera & Castilla, 2013).

#### **2.2.1.3.2. Revoluciones por minuto**

La velocidad de giro oscila entre 40 y 120 revoluciones por minuto (rpm), y esto depende del tamaño del diámetro y la resistencia de la roca; si la roca es blanda el diámetro será menor y mayor la velocidad de rotación. (Herrera y Castilla, 2013)

#### **2.2.1.3.3. Presión de percusión**

La presión de percusión se utiliza en técnicas de perforación con martillo de fondo, donde la energía de impacto se transmite a la broca mediante una cadena de perforación y un martillo en el fondo del pozo. Esta presión de impacto se aplica de manera intermitente para romper y triturar la formación geológica; en el método de perforación con martillo de fondo, la regulación de la fuerza de impacto se logra mediante la configuración del sistema del martillo, la elección de la presión del aire o líquido y la frecuencia de los golpes. La presión de percusión adecuada es esencial para lograr una penetración efectiva y eficiente de la formación geológica (Herrera & Castilla, 2013). El emboquillado debe tener una presión de 130 bar y una presión full de 170 a 200 bar.

#### **2.2.1.3.4. Presión de avance**

El parámetro mide generalmente expresado en términos de fuerza por unidad de área, como psi (libras por pulgada cuadrada) o Pa (pascales). Durante la

perforación, la broca aplica una presión de avance para romper y triturar la formación geológica y avanzar en la creación del pozo. La magnitud de la presión de avance puede fluctuar según diversos factores, como la dureza de la formación geológica, la eficiencia de la broca y los parámetros de perforación utilizados (Herrera & Castilla, 2013). La presión necesaria durante el proceso de encaje debe ser de 60 bares y de 10 a 100 bar en fuerza de avance.

#### **2.2.1.3.5. Importancia de la eficiencia y rendimiento en el proceso de perforación**

Los aspectos que influyen en la disminución de la eficiencia de la energía explosiva disponible involucran factores como la elección del explosivo y, sobre todo, la precisión en el proceso de perforación, lo que, si no es llevado a cabo propicia la aparición de falencia en la calidad del trabajo, como taladros desviados, espaciados irregulares o longitudes no uniformes. En tal sentido, es especialmente importante conocer y asegurar las mejores las condiciones de perforación en el área de trabajo (EXSA, 2019).

#### **Diámetro de perforación**

Elegir el diámetro adecuado es esencial para optimizar la extracción de material y la eficiencia operativa. Esto involucra considerar las características geológicas y los objetivos de producción (Ticllasuca, 2019).

### **Longitud de perforación**

La longitud de perforación impacta en la eficiencia. Se busca un equilibrio entre reducir ajustes y mantener la precisión, basado en la profundidad y los objetivos de avance (Ticllasuca, 2019).

### **Rectitud en la perforación**

La precisión en los patrones de perforación depende de la rectitud de las perforaciones. Tecnologías modernas pueden mejorar esta precisión, esencial para la colocación de explosivos y la fragmentación de la roca (Ticllasuca, 2019).

### **Estabilidad de taladros**

La estabilidad de los taladros es crucial para la seguridad y la integridad de la excavación. Diseño y monitoreo adecuados son esenciales para evitar derrumbes (Ticllasuca, 2019).

### **Velocidad de perforación y barrido**

Encontrar un equilibrio en la velocidad de perforación es clave. Demasiada rapidez aumenta el desgaste, mientras que muy poca reduce la eficiencia. El barrido adecuado también es vital para la limpieza y eficacia en la penetración (Ticllasuca, 2019).

## **2.2.2. Aceros de perforación en minería**

### **2.2.2.1. Componentes de la columna de perforación**

La columna de perforación, tren de perforación o sarta, se conforman por elementos unidos entre sí por medio de roscas y sus elementos de columna son:

#### **a) Shank**

También conocido como adaptador de broca, es un componente fijado a las perforadoras que recibe energía de rotación, impacto y empuje, y la transmite a lo largo de la columna de perforación hasta llegar a la broca. Existen dos tipos de Shank utilizados: el tipo Leyner de 25 mm y 32 mm de diámetro, y el tipo estriado de 38 mm, 44 mm y 50 mm de diámetro. Estos se utilizan con perforadoras que tienen una potencia de impacto de perforación de 18 a 20 kW. (Zapana, 2022).

#### **b) Acople**

Elemento que transmite energía, la forma en que se mide varía según el tipo de rosca utilizado al conectar; estas roscas pueden ser de tipo R o tipo T, ya que los acoples son empleados para unir el Shank con las barras; el acople suficiente asegura que ambos lados estén en contacto y se dé la transmisión de energía óptima al chocar con la roca (Zapana, 2022).

### **c) Barra**

Es aquel componente que extiende la perforación en las columnas, esta puede caracterizarse por secciones hexagonales o redondas, con un adaptador extremo de gran dimensión, pistón y broca amplia en rocas más finas. Además, existen acoplamientos integrados de barras que permiten la manipulación de estas, eliminando así el uso de acoples y contribuye a mejorar la transferencia de energía en los barrenos (Zapana, 2022).

### **d) Brocas**

Las brocas son elementos primordiales para la columna de perforación, ubicadas al final de esta; se cuenta con botones balísticos, semibalísticos y esféricos. Las brocas cuentan con un orificio lateral y central ya que se pueda inyectar el fluido del barrido y así remover los detritos que se encuentran en las hendiduras; además, están diseñadas con una punta amplia que entra en contacto con la superficie de la roca y así evita exceder a las paredes del taladro (Zapana, 2022).

#### **2.2.2.2. Propiedades requeridas en los aceros de perforación: resistencia, dureza, tenacidad, etc.**

Estas propiedades son cruciales en los aceros de perforación, ya que deben soportar condiciones extremadamente exigentes durante el proceso de perforación en la industria minera y de la construcción:

#### **a) Resistencia**

La resistencia se refiere a la capacidad del material para soportar cargas o tensiones sin sufrir deformación permanente o falla, una alta resistencia es esencial para soportar las fuerzas y presiones involucradas en el proceso de perforación (Arroyo & Asto, 2023).

#### **b) Dureza**

La dureza se relaciona con la capacidad de un material para resistir la deformación plástica, la abrasión o la penetración, la dureza es importante porque la broca o la herramienta de perforación deben mantener su forma y filo mientras perforan a través de rocas duras y abrasivas (Arroyo & Asto, 2023).

#### **c) Tenacidad**

La tenacidad se refiere a la capacidad de un material para absorber energía antes de romperse. La tenacidad es esencial para evitar la fractura o rotura de la broca o la herramienta de perforación cuando se enfrenta a condiciones imprevistas o cargas repentinas (Arroyo & Asto, 2023).

#### **d) Templabilidad**

La templabilidad es la capacidad de un acero para endurecerse mediante el tratamiento térmico, como el temple y revenido, es importante para garantizar que

la broca o la herramienta de perforación pueda mantener su dureza y resistencia en condiciones de trabajo difíciles y cambiantes (Arroyo & Asto, 2023).

### **2.2.2.3. Desgaste y factores de deterioro de los aceros en ambientes mineros**

#### **a) Alineación**

Los factores existentes afectan los valores de alineación de los barrenos, ya que estos barrenos deben tener rectitud y una distribución óptima de los explosivos. Las derivaciones totales del barreno se dan del resultado en conjunto de alineaciones indebidas y mal emboquilladas que generan problemas en la perforación (Zapana, 2022).

#### **b) Emboquillado**

El procedimiento de encaje involucra presionar la broca contra la roca para iniciar la perforación, manteniendo una presión de avance y percusión baja. Después, es necesario aumentar la energía del impacto y la presión de avance para lograr una penetración en la roca de al menos 1 pie. Una vez alcanzada la profundidad deseada, se insertará la barra recta y en la dirección planificada (Zapana, 2022).

### **c) Posicionamiento**

Los brazos del equipo deben de presionar continuamente la roca antes y después de la perforación, asegurándose que no exista movimiento, evitando que se doble o rompa el equipo; como adicional se puede colocar un deslizador para así utilizar toda la fuerza de avance a una alta velocidad de penetración (Zapana, 2022).

### **d) Desgastes de insertos**

Los desgastes de insertos se dan por cortes durante la perforación; estos insertos son piezas de metal duro con carburo de tungsteno, el cual se desgasta en procesos de perforación generados por filos de corte, abrasiones, impactos contra la roca y/o fracturas (Zapana, 2022).

## **2.2.2.4. Técnicas actuales para aumentar la vida útil de los aceros de perforación**

### **a) Afilado de brocas**

El proceso de afilado de las brocas es esencial para asegurar un rendimiento óptimo durante la perforación. Mantener la velocidad de perforación en niveles adecuados es crucial, ya que las brocas muy desgastadas solo causan retrasos en el proceso, lo que a la larga resulta más costoso que simplemente reemplazar la broca (Zapana, 2022).

### **2.2.3. Factores que Afectan la Vida Útil de los Aceros de Perforación**

#### **2.2.3.1. Descripción de los principales factores que influyen en el desgaste de los aceros**

El desgaste útil de aceros es limitante importante en la perforación debido a factores como velocidad de rotación dependiente de las características del macizo rocoso, sumado al diámetro de perforación y la longitud de barra. En tal sentido, uno de los factores más importantes involucra el índice de desgaste de la broca, que está directamente relacionado con la abrasión de la roca. Este proceso gradualmente reduce el diámetro de la broca y desgasta los insertos o botones, lo que demanda afilado constante. Además, se encuentra la vida útil del acero, que se refiere al tiempo operativo efectivo del conjunto de varillaje antes de que se degrade o fracture debido a fatiga (Bernaola, et al, 2013)

La determinación del método de perforación, ya sea rotación simple o rotopercusión, depende significativamente de la dureza y abrasividad de la roca en cuestión. Por lo general, en rocas más suaves se requiere una velocidad de perforación mayor (generalmente hasta un límite de 1 500 rpm). Por el contrario, en rocas más resistentes a la compresión, se necesitará una mayor fuerza y torque para llevar a cabo la perforación de manera eficaz (EXSA, 2019).

### **2.2.3.2. Influencia de la geología en el desgaste de los aceros**

#### **a) Relación entre el macizo rocoso y la perforación**

La relación entre el macizo rocoso y la perforación se refiere a cómo las características y propiedades del macizo rocoso influyen en los procesos y resultados de perforación. El macizo rocoso tiene un impacto significativo en la perforación, y es fundamental comprender sus características para seleccionar las herramientas, técnicas y estrategias adecuadas (INACAP, 2014). La interacción entre el macizo rocoso y la perforación determinará la eficiencia, la calidad y la seguridad del proceso de perforación en el contexto específico de cada proyecto. Estas son algunas de las principales relaciones entre ambos:

- Dureza y resistencia.
- Textura y fracturación.
- Porosidad y permeabilidad.
- Presencia de agua.
- Características geológicas.

#### **b) Propiedades del macizo rocoso y su influencia en la perforación**

La roca posee propiedades físicas que influyen significativamente en los mecanismos de penetración dentro del proceso de perforación como tal, por ende,

es un factor crítico para la elección del método de perforación. A continuación, se describe la influencia del macizo rocoso por cada una de sus propiedades físicas.

- Dureza: La dureza de un material se refleja en su resistencia ante la penetración, rayado o deformación. Básicamente, mide cuán bien un material puede mantener su forma y resistir daños cuando se somete a fuerzas. La dureza es una propiedad clave que influye en la durabilidad y desempeño de un material en diversas aplicaciones (Famesa Explosivos S.A., 2019).
- Resistencia: La resistencia de un material está relacionada con su capacidad para soportar cargas y fuerzas sin sufrir deformaciones permanentes o fracturas. Es un indicador de la capacidad de un material para aguantar la presión. La resistencia es vital en contextos donde se busca mantener la integridad estructural, como en la construcción y la ingeniería (Famesa Explosivos S.A., 2019).
- Elasticidad: La elasticidad hace referencia a cómo un material puede deformarse bajo una carga y luego recuperar su forma original cuando se retira la carga. Un material elástico puede experimentar cambios temporales en su forma, pero regresará a su estado original cuando se elimina la fuerza. Esta propiedad es fundamental en aplicaciones como resortes y amortiguadores (Famesa Explosivos S.A., 2019).

- Plasticidad: La plasticidad se refiere a la capacidad de un material para cambiar permanentemente su forma sin romperse. Un material plástico puede ser moldeado o estirado de manera sostenida, manteniendo su nueva forma después de la deformación. Esta propiedad es esencial en procesos de moldeo y fabricación (Famesa Explosivos S.A., 2019).
- Abrasividad: Se relaciona con la habilidad de un material para desgastar, rayar o erosionar otros materiales cuando entran en contacto. Los materiales abrasivos son comunes en actividades como lijado y corte, y la resistencia al desgaste es un factor clave para determinar la vida útil de herramientas y equipos (Famesa Explosivos S.A., 2019).

#### **2.2.3.3. Desgaste de la broca por abrasión**

El desgaste de la broca por abrasión se produce cuando la superficie de la herramienta de corte se desgasta gradualmente debido al contacto repetido con materiales abrasivos durante operaciones de perforación o corte. Esta acción erosiva resulta en la pérdida gradual de material de la broca, lo que puede disminuir su eficiencia y durabilidad. La abrasión es una consideración clave en trabajos que involucran materiales duros o abrasivos, y su gestión es esencial para mantener el rendimiento de las herramientas y mejorar la productividad (Chirinos, 2015).

#### **2.2.3.4. Desgaste operacional de aceros de perforación**

El desgaste operacional de los aceros de perforación se produce cuando estos materiales experimentan un deterioro gradual debido a la exposición constante y a las condiciones exigentes de la perforación. Factores como la fricción contra la roca y la interacción con elementos abrasivos pueden contribuir a este proceso de desgaste. Con el tiempo, este desgaste puede afectar la resistencia y el rendimiento de los aceros. La gestión efectiva de este desgaste es esencial para optimizar la eficiencia y la durabilidad en las operaciones de perforación subterránea (Echevarria, 2006).

##### **a) Desgaste en brocas de botones**

#### **Fisuramiento de botones**

Un botón fisurado en una broca de perforación puede originarse por distintas causas, como la perforación prolongada y el consecuente estrés excesivo, resultando en fisuras debido al calor y la fricción acumulados. La elección equivocada de método o equipo de reafilado también puede debilitar los botones y propiciar fisuras, al igual que el fenómeno de "piel de serpiente" con capas exfoliadas en los botones. Para solucionar esto, es esencial reducir los intervalos entre reafilados para minimizar la exposición a condiciones adversas y emplear las técnicas y equipos adecuados en el proceso de reafilado, preservando la integridad de los botones. Estos enfoques no solo prolongan la vida útil de las brocas, sino que

también previenen botones fisurados, mejorando la eficiencia y la resistencia de las herramientas de perforación (Echevarria, 2006).

### **Botones triturados**

La presencia de botones triturados en una broca de perforación puede atribuirse diversas causas, como la perforación prolongada que somete a la broca a estrés y calor excesivo, así como el uso incorrecto de métodos y equipos de recarga que debilitan los botones y pueden generar fisuras. Además, el fenómeno de "piel de serpiente" en los botones y la trituración de los laterales debido a la conicidad también pueden resultar en fisuras. Para prevenir estos problemas, se debe reducir la longitud de los intervalos entre reafilados para minimizar el impacto del uso prolongado y emplear técnicas y equipos adecuados en el reafilado para mantener la integridad de los botones. Aunque los botones no muestren desgaste evidente, se recomienda realizar el reafilado, ya que fisuras macroscópicas en el carburo podrían ocasionar fallas en la broca. Estas medidas contribuirán a prolongar la vida útil de la broca y a prevenir la formación de botones fisurados, mejorando la eficiencia general de la perforación (Echevarria, 2006).

### **Rotura de botones en interior**

La rotura interna de botones en una broca de perforación puede originarse por diversas causas. Uno de los motivos es el excesivo sobresalimiento del botón debido al desgaste alto en el acero circundante, debilitando su capacidad de carga.

Además, un embullido mal ejecutado puede agravar el problema al debilitar la estructura del botón. Para abordar esto, es fundamental rebajar los botones a su altura normal y asegurarse de su uniformidad, manteniendo la capacidad de carga. Al realizar embullido, reducir la velocidad de percusión y la fuerza de avance evita un debilitamiento excesivo. Implementar estas medidas puede prevenir la rotura de botones en la broca, mejorando su vida útil y desempeño en la perforación (Echevarria, 2006).

### **Rotura de brocas**

La rotura de brocas durante la perforación puede deberse al uso inadecuado en condiciones geológicas, como perforar rocas duras con una broca para rocas blandas, o una presión de alimentación excesiva que supera su resistencia. Para evitarlo, es crucial seleccionar la broca adecuada, ajustar la presión de alimentación según las especificaciones y monitorear el desgaste durante la perforación. Estas medidas mejorarán la eficiencia y seguridad en la operación (Echevarria, 2006).

#### **b) Desgaste en barrenos**

### **Fisuramiento transversal de barrenos integrales**

Este problema puede surgir debido a tensiones y cargas desiguales en la broca o barrena, ocasionadas por factores como la desalineación en la perforación, el uso incorrecto de la herramienta o la falta de mantenimiento. Soluciones para

esto incluyen la alineación adecuada de la perforadora, inspecciones regulares para detectar desgaste y la implementación de técnicas de perforación que reduzcan el impacto de las fuerzas transversales (Echevarria, 2006).

### **Fisuramiento longitudinal de barrenos integrales**

La fisura longitudinal puede originarse por cargas longitudinales excesivas en la barrena debido a la mala distribución de la carga, operaciones a alta velocidad o una técnica de perforación inadecuada. Reducir la velocidad de perforación, implementar una técnica adecuada y ajustar la carga longitudinal ayudan a prevenir este problema (Echevarria, 2006).

### **Dañado total del frente de barrenos integrales**

El daño total del frente de barrenos se debe a la aplicación de cargas excesivas o impactos en la parte frontal de la herramienta, provocando una falla catastrófica. Asegurarse de que la herramienta esté diseñada para soportar las cargas esperadas y evitar impactos excesivos o choques son medidas preventivas efectivas (Echevarria, 2006).

### **Rotura de barra**

La rotura de la barra puede ser causada por una carga excesiva, una mala alineación, fatiga del material o un uso inadecuado. Soluciones incluyen una

alineación precisa, evitar sobrecargas y seleccionar barras de alta calidad (Echevarria, 2006).

### **Rotura de culata de barra**

La rotura de la culata puede resultar de la exposición a cargas repetidas, golpes inesperados o fallas de diseño. Utilizar barras diseñadas para soportar las condiciones específicas y evitar impactos bruscos son enfoques para prevenir esto (Echevarria, 2006).

### **2.2.3.5. Análisis de la Composición del Botón de Corte en Relación con la Vida Útil de la Broca**

El análisis está estrechamente vinculado con las propiedades del material utilizado en los botones de corte, específicamente el carburo de tungsteno (WC). El carburo de tungsteno, en combinación con un aglutinante metálico como el cobalto (Co), constituye el material principal de los botones de corte debido a su alta dureza, resistencia al desgaste y capacidad de mantener el filo en condiciones abrasivas. Según la literatura técnica y estándares de fabricación, la composición de los botones de corte se encuentra generalmente en los siguientes rangos: Carburo de tungsteno (WC) entre 85% – 93%, Cobalto (aglutinante) entre 7% – 15%. Cabe precisar que, si bien la vida útil alcanzada permite evaluar la efectividad del diseño y material de los botones, el porcentaje de WC no varía según el rendimiento, sino

que está definido por el tipo de roca y los requerimientos del proceso de perforación (Zahariadis et al., 2015).

### **2.3. Definiciones conceptuales**

#### **2.3.1. Macizo rocoso**

Un macizo rocoso se refiere a una formación geológica compuesta principalmente por rocas sólidas y compactas. Es una masa de rocas que se encuentra en la corteza terrestre y puede abarcar desde pequeños fragmentos hasta extensiones geográficas muy amplias; puede estar compuesto por diferentes tipos de rocas, como granito, basalto, caliza, cuarcita, entre otros (Concha, 2020).

#### **2.3.2. Perforación y voladura**

La perforación implica la creación de agujeros mediante el uso de maquinaria especializada, como perforadoras, para acceder al macizo rocoso. Estos agujeros se llenan luego con explosivos; la voladura se refiere al proceso de detonar los explosivos, generando una liberación de energía que fragmenta y rompe las rocas (Herrera & Castilla, 2013).

#### **2.3.3. Operación minera**

La operación minera es el conjunto de actividades y procesos llevados a cabo para la extracción y producción de minerales o recursos mineros de la Tierra.

Incluye diversas etapas, como la exploración, el desarrollo, la extracción, el procesamiento y el transporte de los minerales (Sonami, 2016).

#### **2.3.4. Rendimiento**

El rendimiento en perforaciones se refiere a la eficiencia y productividad de las operaciones de perforación, se utiliza para medir la cantidad de trabajo realizado en relación con el tiempo y los recursos utilizados. En el contexto de la perforación, el rendimiento puede evaluarse en función de varios factores, como la velocidad de perforación, la capacidad de penetración de la broca, el tiempo requerido para completar un agujero, la calidad de los agujeros perforados y la utilización efectiva de los equipos y herramientas (Escudero, 2021).

#### **2.3.5. Frentes de avance**

Los frentes de avance son las áreas activas donde se desarrollan las operaciones de construcción, excavación o avance en proyectos de ingeniería, representando el punto focal de las actividades de progreso y desarrollo del proyecto (Feijoo & Arias, 2023).

#### **2.3.6. Optimización**

La optimización en perforación se refiere al proceso de mejorar y maximizar la eficiencia y productividad de las operaciones de perforación. En el contexto de perforación de pozos, ya sea para extracción de petróleo, gas, agua u otros fines, la

optimización implica la aplicación de estrategias y técnicas para lograr una mayor velocidad de perforación, una mayor vida útil de la broca, una mejor calidad de los agujeros perforados y una utilización más eficiente de los equipos y recursos disponibles (Manobanda, 2021).

### **2.3.7. Productividad**

La productividad en perforaciones se refiere a la medida de la eficiencia y rendimiento de las operaciones de perforación en términos de la cantidad de trabajo realizado en relación con los recursos y el tiempo empleado (Flores, 2019).

### **2.3.8. Perforabilidad**

La perforabilidad se define como la facilidad o dificultad que presenta un macizo rocoso para ser penetrado por un sistema de perforación. Este concepto depende de múltiples factores como la resistencia a la compresión uniaxial, dureza mineralógica, estructura interna de la roca, presencia de fracturas, y contenido de minerales abrasivos. Una alta perforabilidad implica que la roca puede ser perforada con relativa facilidad y a alta velocidad, mientras que una baja perforabilidad implica mayor resistencia, desgaste de herramientas y menor rendimiento (Zahariadis et al., 2015).

## **Capítulo III**

### **Marco Metodológico**

#### **3.1. Planteamiento metodológico**

La investigación obtiene sus resultados siguiendo el método científico, realizando la siguiente metodología de trabajo paso a paso, la cual describimos a continuación:

- Elaboración de la línea base en cuanto a rendimientos de perforación antes de la aplicación de los equipos y materiales.
- Identificación de factores de mantenimiento y operacionales que influyen en el desgaste apresurado de los aceros de perforación.
- Aplicación de los equipos y materiales para optimizar el tiempo de vida práctico de los aceros de perforación, permitiendo que este en cumplimiento de lo planeado.
- Evaluación del nuevo rendimiento de perforación en los frentes de avances después de la aplicabilidad de los equipos y materiales.

#### **3.2. Población y muestra**

La población está constituida por el uso de aceros de perforación en los frentes de avance de una mina subterráneas del norte del Perú.

La muestra está constituida por el uso de barras de 6 pies y brocas de 38 mm en frentes de avance de una mina del norte del Perú.

**Tabla 2**

Población y muestra

ELEMENTO	CANTIDAD	DESCRIPCIÓN	CONDICIÓN	VIDA ÚTIL
BROCAS DE PERFORACIÓN	15	Brocas de 38 mm utilizadas en los frentes de avance	Sin Optimizar	327 pies
BROCAS DE PERFORACIÓN	15	Brocas de 38 mm utilizadas en los frentes de avance	Optimizado	pies

### 3.3. Equipos y materiales

Para la ejecución del planteamiento de la presente investigación se pretende aplicar los siguientes recursos:

- Aplicación de herramientas de mantenimiento con aplicación de métodos como el propuesto por Kaizen para lograr la integración de los trabajadores en el aporte del cuidado y mantenimiento preventivo de los aceros de perforación.

- Gestión de actividades de capacitación y entrenamiento en el área de trabajo referente al cuidado y mantenimiento de los aceros de perforación considerados como muestra.
- Aplicación de criterios empíricos en la reducción y control del desgaste de aceros de perforación con el fin de optimizar su tiempo de vida útil en el desarrollo de las operaciones de perforación en interior mina.
- Guía de observación y toma de datos de parámetros de perforación y condiciones de broca y barras de perforación tras cada operación de perforación en el avance de labores de desarrollo.
- Instrumentos de toma de datos de campo como flexómetro, vernier, picota de geólogo, brújula, entre otros.

#### **3.4. Procedimiento de las pruebas experimentales**

La toma de datos en los frentes de perforación será llevada a cabo con las técnicas e instrumentos de recolección de datos que se describen más adelante, posterior a ello se realiza el análisis de datos mediante el uso de hojas de cálculo de Excel y soporte profesional-técnica provisto por la unidad minera de estudio. Las técnicas y procedimientos aplicados para el incremento de la vida útil de los aceros de perforación considerados como muestra, son realizados por personal competente y autorizado por la residencia de la unidad, cuyos resultados de medición son

facilitados para la validación de resultado de la presente investigación considerando un plazo de 02 meses de estudio.

### **3.5. Técnicas de recolección de datos**

#### **a) Revisión del material documentario**

Esta técnica permitirá la recolección de información relevante sobre el programa de avances de las labores de mineras, el porcentaje de incidencias por aceros, reportes diarios de producción, registros de datos de mantenimiento pasados, entre otros. Asimismo, posibilitará la obtención de información digital en buscadores referente a estándares, guías y manuales para el cuidado y uso de los aceros de perforación.

#### **b) Observación**

Permite la recolección de información cuantificable a partir del monitoreo y medición de los aceros de perforación en el campo.

### **Instrumentos de recolección de datos**

#### **a) Guía de observación**

Instrumento que permitirá la recolección de datos a través de pautas de observación sobre desempeños directamente observables en los procesos de perforación “in situ”.

### **b) Guía de análisis documental**

A través de este instrumento se obtendrá la información relevante estándares, guías y manuales para el cuidado y uso de los aceros de perforación.

### **c) Hojas de registro**

Instrumento que permite la recopilación y organización de datos de los procesos de perforación para el análisis de las variables de estudio tomados “in situ”.

## **3.6. Técnicas para el procesamiento de datos**

A partir de los datos recolectados se realizará el análisis descriptivo y predictivo sobre el rendimiento de aceros de perforación mediante el uso de hojas de cálculo para la comparación estadística de resultados entre los rendimientos de aceros obtenidos en campo.

## Capítulo IV

### Resultados

#### 4.1. Descripción de las pruebas experimentales

##### Parámetros de perforación en labores de avance

La tabla a continuación describe los Parámetros de la sección de avance 8'x9', que serán utilizados como el modelo estándar en el presente estudio. Estos parámetros establecen una base fundamental para la comparación y el análisis de los resultados.

**Tabla 3**

Parámetros de la sección de avance 8'x9'

Descripción	Dimensiones	Unidades
Ancho	2,44	m
Alto	2,74	m
Longitud de barreno	1,83	m
Eficiencia de perforación	94,0	%
Diámetro de taladro	38,0	mm
Longitud de taladro	1,7	m
Densidad	2,7	t/m <sup>3</sup>
Tonelaje	26,3	t

Nota. (Famesa Explosivos S.A., 2019)

El número de taladros será determinado con las ecuaciones detalladas a continuación:

$$\text{N}^\circ \text{ de taladros} = \frac{4\sqrt{S}}{E} + k * S \dots \dots \dots (1)$$

Donde:

S = Área (m<sup>2</sup>)

E = Distancia entre taladros de la circunferencia o periféricos (m)

Según dureza:

- Tenaz                    0,50 – 0,55
- Intermedia            0,60 – 0,65
- Friable                 0,70 – 0,75

k = Coeficiente de roca

Según dureza:

- Tenaz                    2,00
- Intermedia            1,50
- Friable                 1,00

Entonces:

- k = 1,5
- E = 0,60
- S = 6,05 m<sup>2</sup>

$$\text{N}^\circ \text{ de taladros} = \frac{4\sqrt{6,05}}{0,60} + 1,5 * 6,05$$

$$\text{N}^\circ \text{ de taladros} = 26$$

Más 3 taladros de alivio

$$\text{N}^\circ \text{ total de taladros} = 29$$

Podemos calcular la longitud total a perforar por cada frente de la siguiente manera:

Longitud de perforación = Longitud del barreno \* Eficiencia \* N° total de taladros

Los valores son:

- Longitud del barreno = 1,83 metros.
- Eficiencia de perforación = 94 %
- Número total de taladros = 29

Podemos calcular la longitud total de perforación por frente de la siguiente manera:

$$\text{Longitud de perforación por frente} = 1,83 \text{ metros} * 0,94 * 29 \text{ taladros}$$

$$\text{Longitud de perforación por frente} = 50 \text{ metros}$$

Entonces, para un disparo se requiere realizar aproximadamente un total de 50 metros de perforación.

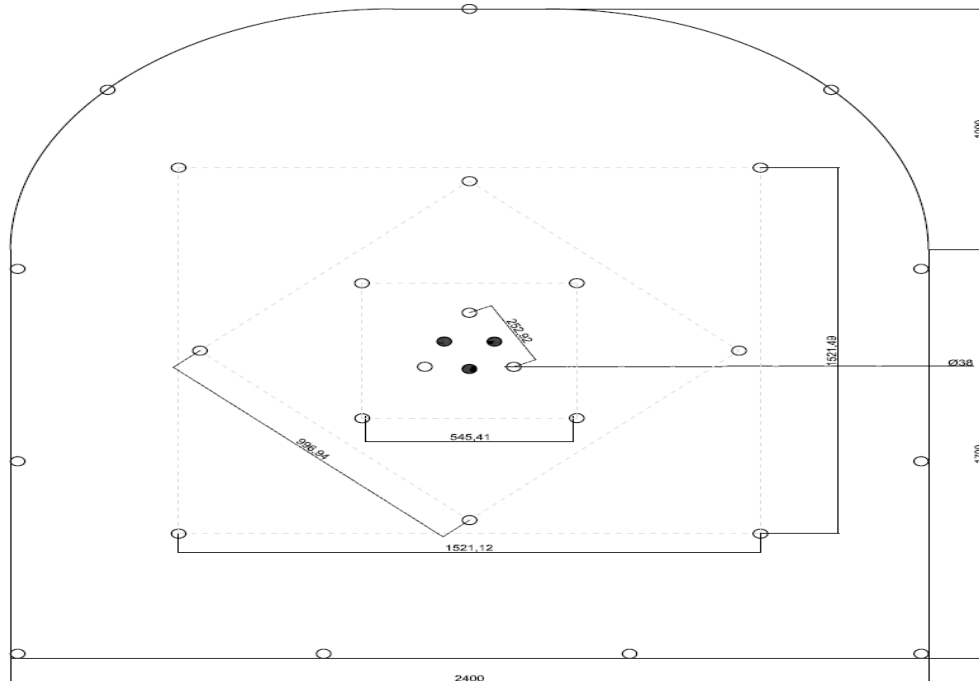
A continuación, en la siguiente figura muestra un diseño de malla para una sección que tiene dimensiones de 8 pies por 9 pies (aproximadamente 2,44 metros por 2,74 metros), una sección típica para nuestro estudio. Este diseño se utiliza en una formación rocosa de tipo regular. La técnica de arranque empleada en esta sección se llama "corte quemado".

En el diseño, se han dispuesto un total de 29 taladros todos de 38 mm de diámetro. De estos, 26 taladros serán cargados con explosivos, lo que significa que contienen material explosivo para la detonación. Estos taladros cargados son esenciales para romper la roca de manera controlada.

Además, se han incluido 3 taladros de alivio en el diseño. Estos taladros de alivio no contienen explosivos y se utilizan para reducir la presión y controlar la fragmentación de la roca en la sección. Esta estrategia de alivio es importante para evitar daños no deseados y garantizar que la voladura sea segura y eficaz, también cumplen la función de servir como cara libre.

**Figura 1**

Diseño de malla para una sección de 8'x 9'



Nota. (Famesa Explosivos S.A., 2019)

**Tabla 4**

Malla para sección

Malla para sección 2,4 X 2,7	
Tipo de roca	Roca media (III)
Nº total de taladros	29
Taladros de alivio	3
Longitud de barra	6'

Nota. (Famesa Explosivos S.A., 2019)

## **Análisis de Problemas y Optimización de Aceros en la Perforación**

### **Desviación de los barrenos**

El problema en la operación de perforación con Jackleg radica en que el operador, en lugar de iniciar la perforación según el estándar recomendado, procede a perforar directamente con percusión alta en lugar de percusión baja. Esta desviación del estándar no solo aumenta el riesgo de lesiones para el operador y su ayudante, sino que también puede generar una mayor desviación en la dirección de la perforación, lo que afecta negativamente la calidad de la perforación, la eficiencia y los costos operativos en la operación.

### **Deficiente rendimiento de los aceros de perforación**

Los aceros utilizados en perforaciones con Jackleg pueden experimentar fallas debido a una variedad de factores. Estos pueden incluir problemas relacionados con la forma en que se opera el equipo, el tipo de roca en la que se perfora, las habilidades del operador y, por último, la calidad del afilado de las brocas. Estas cuestiones pueden contribuir a problemas en la durabilidad y el rendimiento de los aceros de perforación.

La disminución en las tasas de penetración de una broca a medida que se desgasta, incluso en rocas de alta calidad, se debe a una serie de factores interrelacionados. En primer lugar, a medida que los botones de la broca se

desgastan, su capacidad para morder y fragmentar la roca de manera eficiente disminuye. Este fenómeno se traduce en una menor capacidad de penetración, ya que la broca tiene que trabajar más para lograr el mismo resultado.

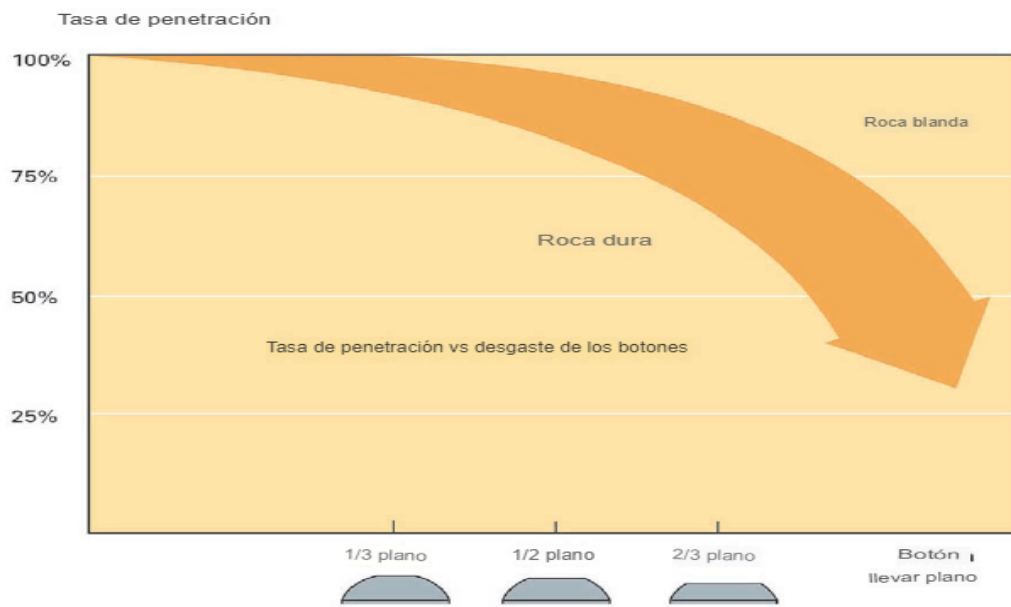
Un correctoafilamiento de los botones de la broca es esencial para mantener su eficacia. Cuando los botones están completos y afilados, pueden cortar la roca de manera más efectiva, lo que se traduce en una mayor velocidad de penetración. Esto, a su vez, tiene un impacto directo en los costos de operación. Un aumento en la velocidad de penetración significa que la operación se completa más rápido, lo que reduce los costos de hora máquina y hora hombre.

Es importante destacar que no se debe esperar a que los botones estén completamente desgastados antes de afilar la broca. Alargar elafilamiento hasta este punto puede llevar a una vida útil más corta de la broca y a una mayor ineficiencia en la operación. En cambio, se recomienda afilar los botones cuando comienzan a mostrar signos de desgaste significativo, lo que prolongará la vida útil de la broca y mantendrá un rendimiento óptimo.

Después de esta explicación, se presenta una figura que muestra claramente la relación entre la velocidad de penetración y el desgaste del botón. Esto brinda una representación visual de cómo la velocidad de penetración disminuye a medida que los botones se desgastan, resaltando la importancia de unafilamiento oportuno para mantener el rendimiento y reducir los costos operativos.

**Figura 2**

Relación de desgaste de botones y tasa de penetración



Nota. Tomado de Face drilling de Atlas Copco.

### **Figura 3**

Desgaste acelerado de la broca, con respecto a una nueva



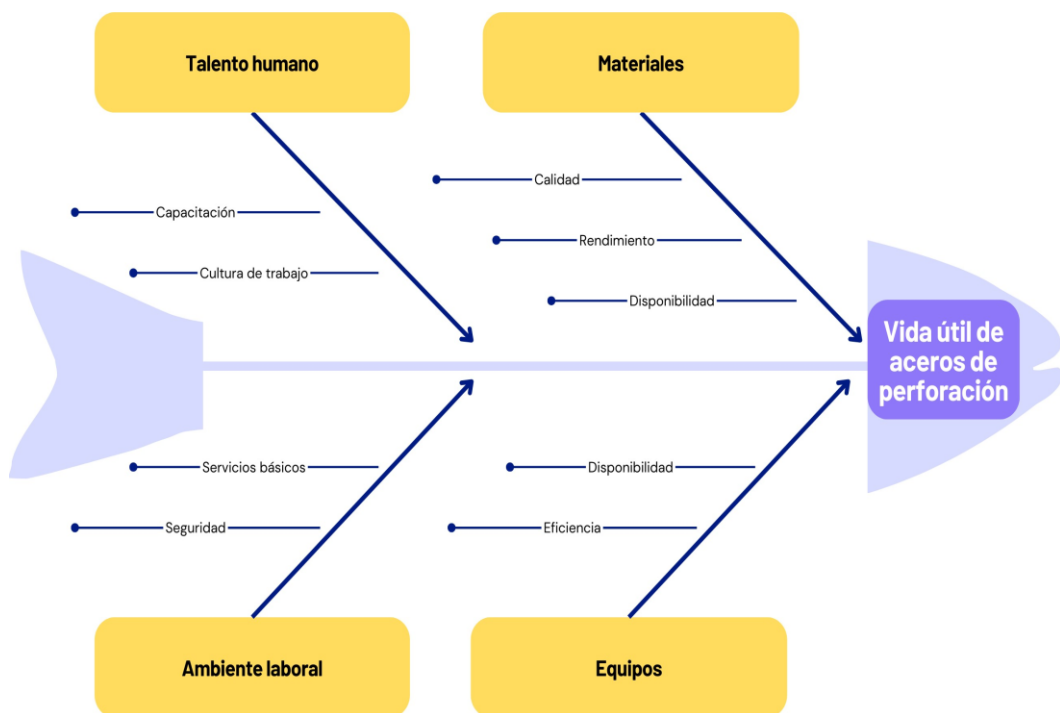
### **Análisis Causa efecto**

A continuación, a través del uso del diagrama de Ishikawa, se presenta una síntesis de los factores determinantes que influyen en la vida útil de los aceros de perforación. El diagrama de Ishikawa, también conocido como diagrama de espina de pescado o diagrama de causa y efecto, ayuda a identificar y visualizar de manera efectiva las diversas causas o elementos que tienen un impacto directo o indirecto en la duración y rendimiento de los aceros utilizados en perforación. Este enfoque permite una comprensión más detallada de los factores clave que pueden influir en

la vida útil de estos materiales, lo que resulta fundamental para abordar y mejorar la eficiencia en operaciones de perforación.

#### Figura 4

Análisis de causa efecto diagrama Ishikawa de la vida útil de aceros de perforación



#### Talento humano

Desempeña un papel crucial en el rendimiento de la perforación con Jackleg. Cuando los operadores no han recibido capacitación adecuada en el uso de los aceros de perforación y no comprenden plenamente los aspectos técnicos de estos

materiales, su rendimiento tiende a ser deficiente. La falta de conocimiento y habilidades específicas puede llevar a un manejo inadecuado de los aceros y, como resultado, a una disminución de su vida útil y eficacia en la perforación.

### **Materiales**

En el ámbito de los materiales utilizados en la perforación con Jackleg, la falta de calidad en los componentes, como las brocas, los guidores y los aceites lubricantes, puede ser una causa de bajo rendimiento. La elección de materiales de baja calidad o el uso de componentes desgastados y obsoletos puede disminuir la eficacia de la operación y acortar la vida útil de los aceros de perforación.

### **Equipos**

La carencia de equipos en funcionamiento y bien mantenidos, así como la falta de recursos críticos como un suministro de aire con la presión adecuada y acceso a agua para la lubricación, pueden resultar en un rendimiento deficiente en la operación de perforación con Jackleg. El mantenimiento y la dotación apropiados de estos recursos son esenciales para garantizar un desempeño óptimo en esta actividad.

### **Ambiente laboral**

El entorno laboral en la perforación con Jackleg también juega un papel importante. La falta de recomendaciones geomecánicas de calidad del terreno puede

causar un rendimiento deficiente. Si no se realizan evaluaciones adecuadas del terreno y no se siguen las recomendaciones para adaptar la operación a las características específicas de la roca, se pueden presentar dificultades en la perforación y un mayor desgaste de los aceros o incluso en la seguridad de los mismos operadores. El ambiente laboral debe proporcionar condiciones óptimas para operar lo cual es esencial para garantizar un rendimiento óptimo en esta actividad.

### **Plan de acción para la optimización de la vida útil de aceros de perforación**

Frente al escenario desfavorable que se ha descrito en relación a las operaciones de perforación, hemos decidido implementar planes de acción en los puntos mencionados previamente. Nuestro objetivo es mejorar significativamente el desempeño operativo. A continuación, se proporcionará un detalle exhaustivo de este plan de acción, diseñado para abordar los desafíos identificados y optimizar la eficiencia en el ámbito de las operaciones de perforación.

#### **Evaluación inicial:**

- Realizar un inventario de los aceros de perforación.
- Evaluar el estado de los equipos de perforación.
- Identificar problemas en la durabilidad de los aceros.

**Formación y capacitación:**

- Capacitar a operadores en el uso y selección adecuado de los aceros.
- Instruir sobre parámetros de perforación, RPM y presión de trabajo.

**Mantenimiento y sustitución:**

- Establecer un programa de mantenimiento preventivo.
- Implementar un registro de mantenimiento.

**Dotación de recursos:**

- Asegurar suministro de aire con presión y caudal adecuado.
- Garantizar acceso a agua.

**Monitoreo continuo:**

- Implementar un sistema de seguimiento de vida útil de los aceros.
- Realizar inspecciones periódicas.

**Evaluación, documentación y ajuste:**

- Evaluar la eficacia del plan de acción y realizar ajustes.
- Mantener registros de todas las acciones tomadas.
- Modificar y adecuar los entendidos de perforación, así como los procedimientos de trabajo seguro.

## **4.2. Presentación y análisis de los resultados**

Es fundamental evaluar constantemente nuestros avances y logros en la operación, especialmente en lo que respecta a la optimización de la vida útil de los aceros de perforación. Con el objetivo de medir el impacto de las mejoras implementadas y determinar los ahorros obtenidos, presentamos a continuación un conjunto de datos que reflejan los avances lineales en metros planeados para los últimos meses. Estos datos son un recurso esencial que nos permitirá evaluar de manera cuantitativa el rendimiento de nuestras operaciones y los efectos de la optimización de los aceros. Con esta información detallada, podremos realizar un análisis en profundidad de nuestro progreso y tomar decisiones informadas para seguir mejorando en el futuro.

**Tabla 5**

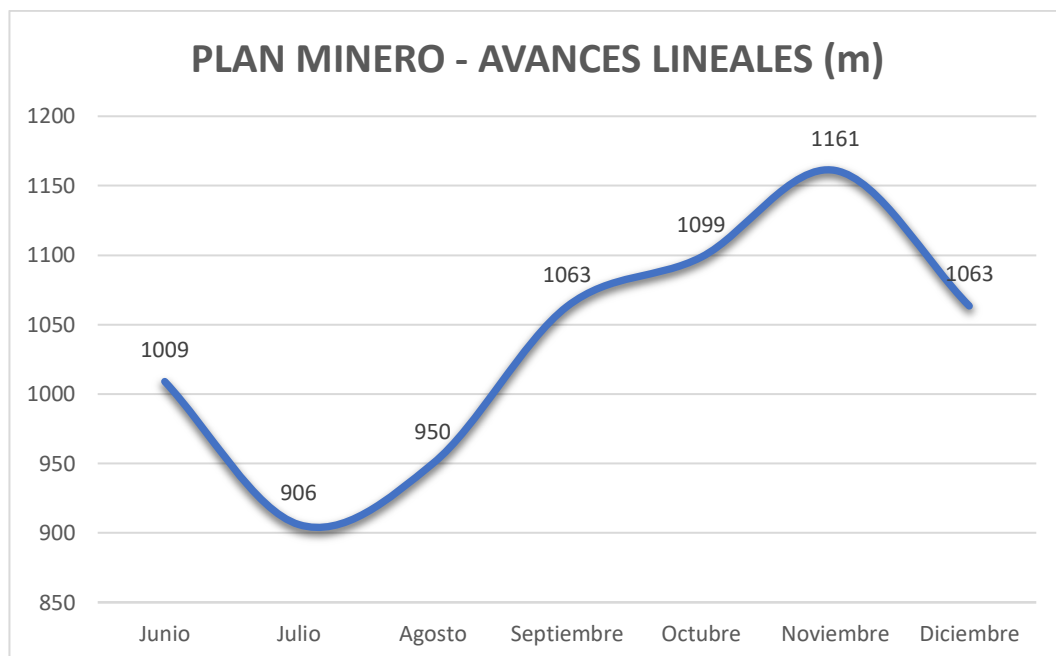
Plan minero - avances lineales (m)

DESCRIPCIÓN	junio	julio	agosto	septiembre	octubre	noviembre	diciembre
Exploración	605	605	650	688	623	668	702
Desarrollo	60	105	115	105	85	90	60
Preparación	81	23	54	100	135	135	71
Operación	155	103	62	145	135	153	170
Rehabilitación de Reservas	-	-	-	-	-	90	60
Proyectos	108	70	69	25	121	25	-
TOTAL	1009	906	950	1063	1099	1161	1063

Nota. Datos tomados de la unidad de estudio.

**Figura 5**

Gráfica del plan minero hasta fines del año 2023



En este informe, se presenta una compilación de los avances lineales registrados en las distintas áreas operativas durante los meses de junio, julio, agosto y septiembre. Estos datos representan el progreso real en términos de metros avanzados en áreas clave, como exploración, desarrollo, preparación, operación, rehabilitación de reservas y proyectos. Además, se ha calculado el grado de cumplimiento en relación a las metas y expectativas iniciales.

**Tabla 6**

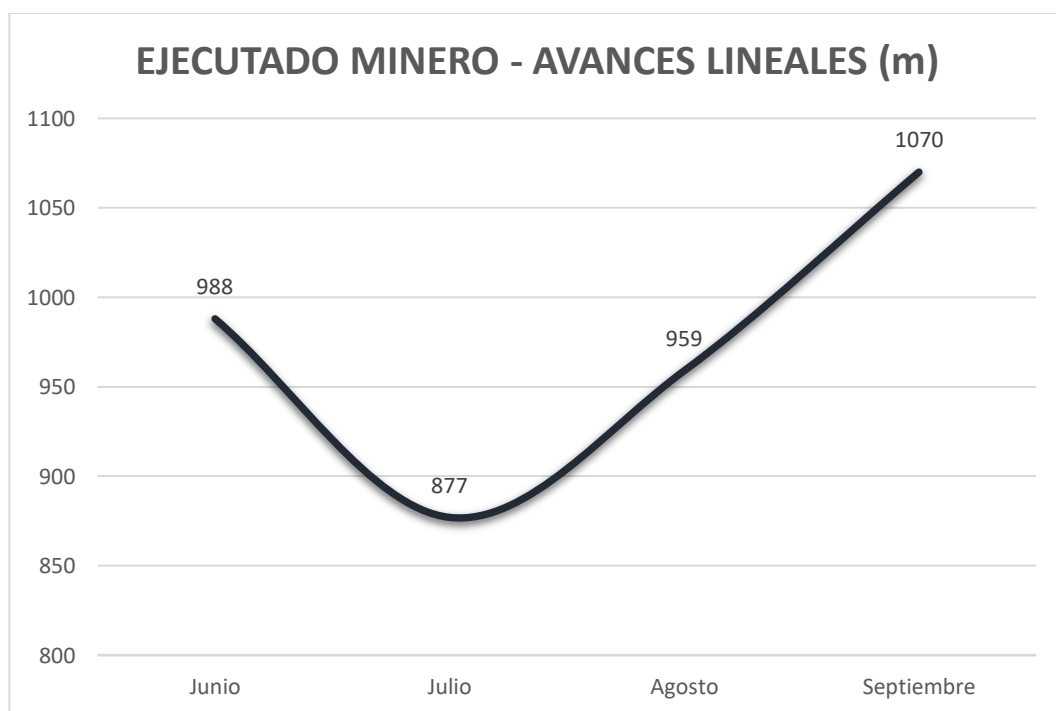
Ejecutado - avances lineales (m)

DESCRIPCIÓN	junio	julio	agosto	septiembre
Exploración	585	578	654	680
Desarrollo	63	97	111	107
Preparación	77	24	49	100
Operación	156	108	70	150
Rehabilitación de Reservas	-	-	-	-
Proyectos	107	70	75	30
TOTAL	988	877	959	1070

Nota. Datos tomados de la unidad de estudio.

**Figura 6**

Gráfica de los avances ejecutados



Se ha preparado una gráfica que compara el cumplimiento de lo planeado con lo ejecutado durante los meses de junio, julio, agosto y septiembre. Esta gráfica ofrece una representación visual de cómo nuestros avances lineales reales se han comparado con nuestras metas y previsiones.

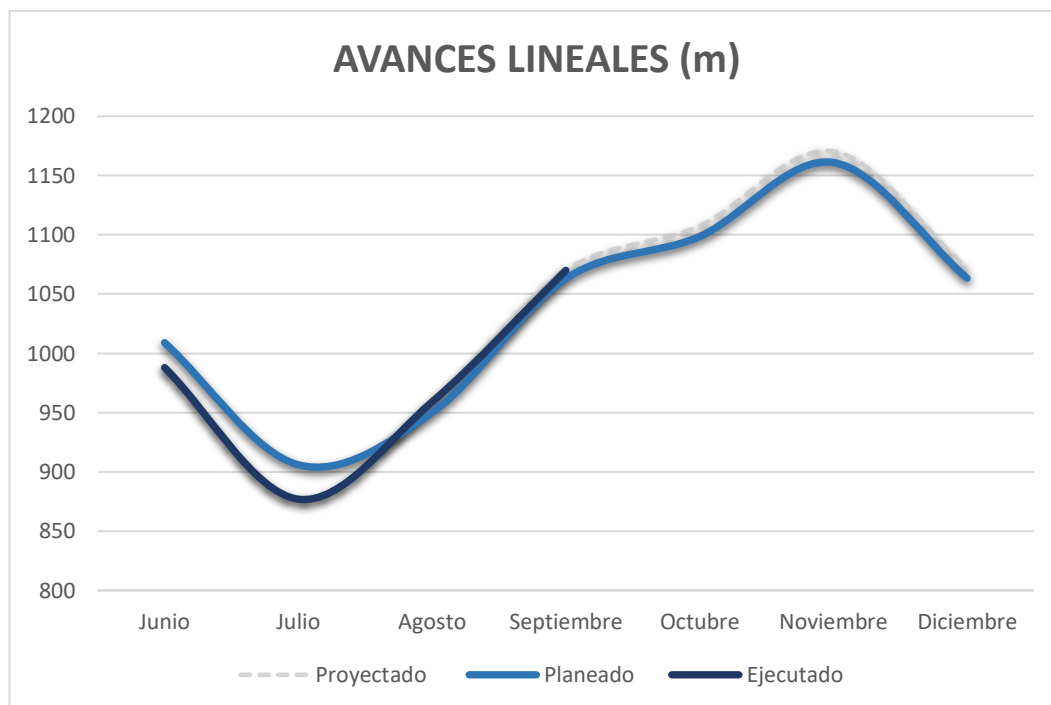
Cada mes se representa como una barra en el gráfico, con dos segmentos de colores diferentes. El segmento en un tono más claro representa el cumplimiento de lo planeado, mientras que el segmento en un tono más oscuro representa el cumplimiento de lo ejecutado.

Además, en la gráfica se proyecta la ejecución de los meses posteriores mediante un promedio de cumplimiento calculado en base a los meses ya ejecutados. Esto brinda una perspectiva anticipada de cómo podrían evolucionar nuestros avances en función de la tendencia observada hasta el momento.

Esta gráfica proporciona una representación clara y concisa de cómo nuestro desempeño real se compara con nuestras expectativas y proyecta cómo podrían evolucionar nuestros avances en los meses siguientes. Nos permite evaluar visualmente si las acciones tomadas para optimizar la vida útil de los aceros de perforación han tenido un impacto positivo en nuestros avances lineales y anticipar el desempeño futuro.

**Figura 7**

Avances lineales Ejecutado junto con lo planeado



Durante el mes de junio, se logró un cumplimiento del 98% con respecto a lo planeado. En julio, el cumplimiento se mantuvo en un 97%, indicando un rendimiento sólido.

Sin embargo, en agosto y septiembre, se observa un aumento significativo en el cumplimiento, alcanzando el 101% en ambos meses. Es importante destacar que las mejoras destinadas a la optimización de la vida útil de los aceros de perforación se implementaron a partir de agosto, lo que se refleja en el aumento del cumplimiento en estos meses.

## **Análisis de comparación de la vida útil de brocas de perforación**

Con el objetivo de evaluar y comparar la vida útil de las brocas de perforación en condiciones similares, se ha llevado a cabo un estudio que abarca un total de 15 brocas. Este análisis se divide en dos etapas: una primera fase que corresponde a las mediciones de vida útil de las brocas antes de la implementación de las mejoras de optimización, y una segunda fase posterior a la implementación de dichas mejoras.

Las mejoras de optimización consistieron en la aplicación de prácticas y procedimientos destinados a prolongar la vida útil de las brocas y aumentar su rendimiento en las operaciones de perforación. Estas mejoras abarcaron aspectos como el afilado de los botones de las brocas, la gestión adecuada de la presión de perforación y otras técnicas de mantenimiento preventivo.

En la primera fase del estudio, antes de la optimización, se observó que todas las brocas perforaron una longitud constante de 327 pies, lo que indica un rendimiento uniforme en estas condiciones. Sin embargo, en la segunda fase, después de la implementación de las mejoras, se observó una variación en la longitud perforada por cada broca. Esta variación refleja la mejora en el rendimiento, ya que algunas brocas lograron perforar distancias significativamente mayores.

El promedio de la longitud perforada antes de la optimización fue de 327 pies, lo que se mantuvo constante en todas las brocas.

Sin embargo, después de la optimización, el promedio aumentó significativamente a 385 pies. Esto indica que las mejoras aplicadas tuvieron un impacto positivo en la vida útil de las brocas de perforación, lo que se traduce en un aumento en la eficiencia y en la capacidad de perforación.

Estos resultados respaldan la efectividad de las mejoras implementadas y subrayan su importancia en la prolongación de la vida útil de las brocas de perforación. Además, demuestran claramente que la implementación de procedimientos de mantenimiento preventivo y prácticas de optimización puede traducirse en un ahorro de costos, un aumento en la productividad y una mejora significativa en el rendimiento de las operaciones de perforación.

**Tabla 7**

Vida útil de brocas de perforación sin optimización

	Longitud Perforado (m)	Longitud Perforado (pies)
B001	110	361
B002	107	351
B003	121	397
B004	117	384
B005	100	328
B006	98	322
B007	83	272
B008	75	246
B009	96	315
B010	108	354
B011	103	338
B012	118	387
B013	98	322
B014	82	269
B015	81	266
	Promedio	327

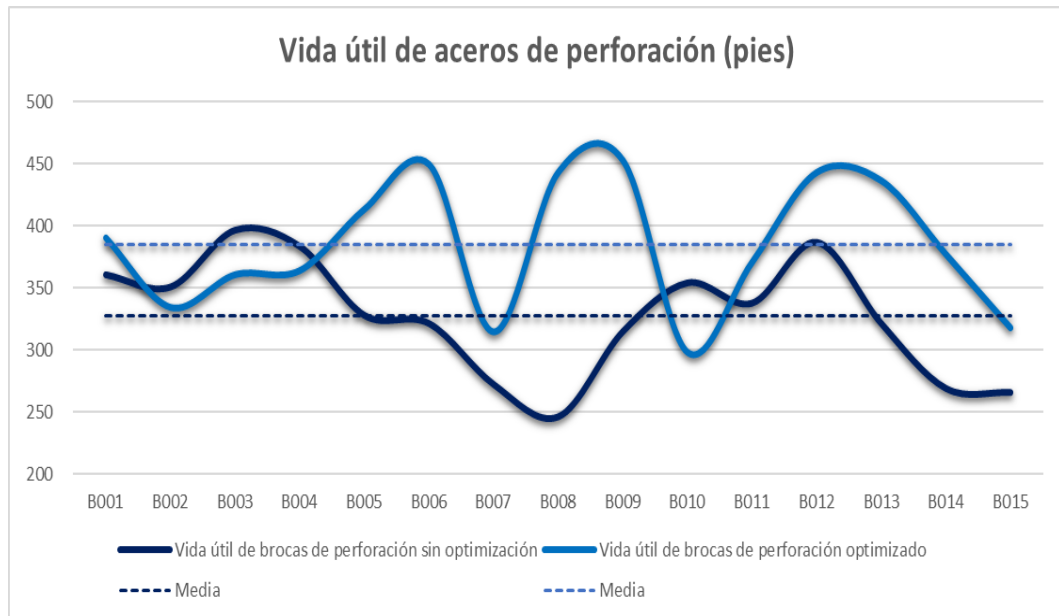
**Tabla 8**

Vida útil de brocas de perforación optimizado

	Longitud Perforado (m)	Longitud Perforado (pies)
B001	119	390
B002	102	335
B003	110	361
B004	111	364
B005	126	413
B006	137	449
B007	96	315
B008	135	443
B009	138	453
B010	91	299
B011	113	371
B012	135	443
B013	133	436
B014	115	377
B015	97	318
	Promedio	385

**Figura 8**

Gráfica de la vida útil de las muestras



### Determinación del ahorro por consumo de aceros de perforación

#### Determinación del costo por metro perforado en brocas:

Sin Optimización:

- Cada broca tiene un valor de \$30.
- La longitud total perforada antes de la optimización en promedio fue de 327 pies.

$$\text{CostoTotal}_{\text{sin Optimización}} = \frac{30 \$}{327} \text{ pies}$$

$$\text{CostoTotal}_{\text{sin Optimización}} = 0,0917 \$/\text{pie}$$

Con Optimización:

- Cada broca tiene un valor de \$30.
- La longitud total perforada después de la optimización en promedio fue de 385 pies.

$$\text{CostoTotal}_{\text{conOptimizacion}} = \frac{30 \$}{385} \text{ pies}$$

$$\text{CostoTotal}_{\text{conOptimizacion}} = 0,0779 \text{ \$/pie}$$

Ahorro por Pie de Perforación con Optimización para una Broca:

$$= \text{CostoTotal}_{\text{sinOptimizacion}} - \text{CostoTotal}_{\text{conOptimizacion}} \dots \dots \dots (2)$$

$$\text{AhorroPorPie} = 0,0917 \text{ \$/pie} - 0,0779 \text{ \$/pie}$$

$$\text{AhorroPorPie} = 0.0138 \text{ \$/pie}$$

Para convertir el ahorro por pie de perforación a dólares por metro:

$$\text{AhorroPorMetro} = \text{AhorroPorPie} \times \frac{3,281 \text{ pies}}{1 \text{ metro}}$$

$$\text{AhorroPorMetro} = 0,0138 \text{ \$/pie} \times \frac{3,281 \text{ pies}}{1 \text{ metro}}$$

$$\text{AhorroPorMetro} = 0,0453 \text{ \$/metro}$$

A continuación, se presenta una tabla que detalla la cantidad de pies perforados durante los meses de junio, julio, agosto y septiembre. Estos datos son fundamentales para evaluar y calcular los ahorros obtenidos durante los primeros dos meses, agosto y septiembre, en los que se implementaron mejoras y optimizaciones en el proceso de perforación. Estos valores proporcionarán una

visión clara de la eficacia de las medidas tomadas y cómo han impactado en la productividad y eficiencia de la operación. La tabla muestra la longitud total perforada en distintas categorías, lo que nos permitirá analizar de manera detallada la evolución de la perforación en el proyecto.

**Tabla 9**

Pies perforados según plan minero

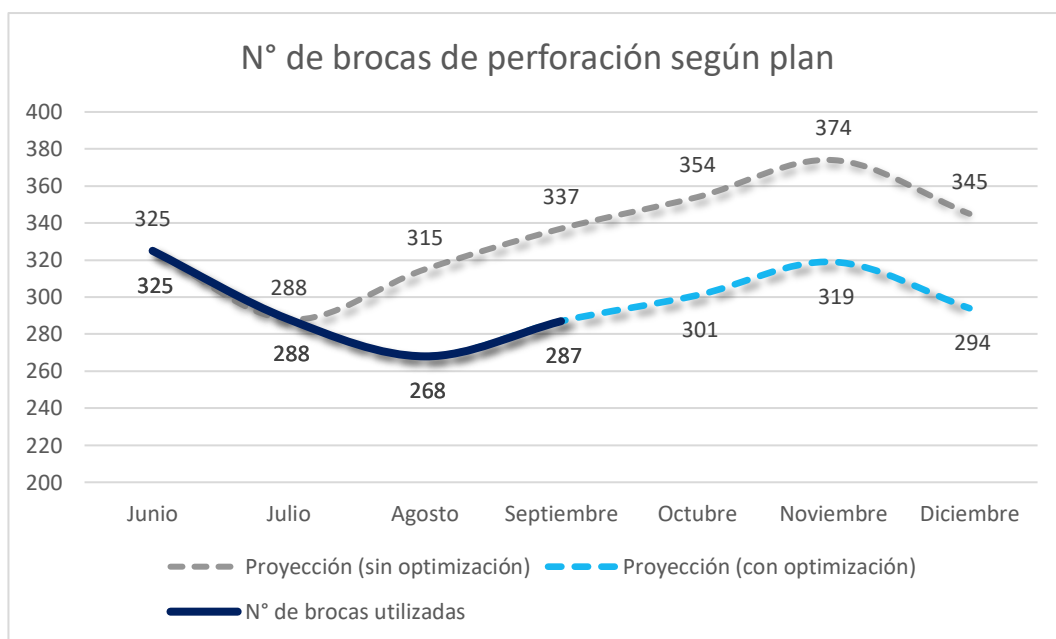
DESCRIPCIÓN	junio	julio	agosto	septiembre
Exploración	62 988	62 118	70 470	72 210
Desarrollo	6 786	10 440	12 006	11 484
Preparación	8 352	2 610	5 220	10 092
Operación	16 704	11 658	7 482	14 094
Rehabilitación de Reservas	-	-	-	-
Proyectos	11 484	7 482	8 004	2 610
<b>TOTAL</b>	<b>106314</b>	<b>94308</b>	<b>103182</b>	<b>110490</b>

A continuación, se presenta una gráfica que representa la cantidad de brocas utilizadas en los meses previos, las brocas ahorradas, y una proyección estimada de cuántas brocas podrían ahorrarse en el futuro a medida que se sigue implementando el plan de optimización. Este análisis se basa en los datos del plan minero presentado anteriormente, lo que nos permitirá comprender cómo la implementación de las mejoras afecta directamente al uso eficiente de este recurso crítico y cómo esto se traduce en ahorros significativos para el proyecto. La

visualización gráfica proporcionará una comprensión clara y rápida de la evolución de la gestión de brocas y su impacto en la operación.

**Figura 9**

Gráfica de la cantidad de brocas a utilizarse



La tabla que se presenta muestra el ahorro mensual en términos del número de brocas ahorradas y el ahorro en dólares. El cálculo de este ahorro se basa en un enfoque proyectivo y compara la cantidad de brocas que se habrían utilizado mensualmente sin la optimización con la cantidad de brocas proyectadas utilizando la optimización. Además, se toma en cuenta que el valor de cada broca es de \$30 dólares.

El proceso de cálculo se desarrolla de la siguiente manera:

#### Proyección sin Optimización

Se proyecta la cantidad de brocas que se habrían utilizado en cada mes si no se hubiera implementado la optimización. Esto se basa en los datos históricos o en una estimación de la utilización de brocas antes de la optimización.

#### Proyección con Optimización

Se proyecta la cantidad de brocas que se utilizarán en cada mes con la optimización implementada. Esto se basa en la observación de cómo la optimización ha influido en la reducción del consumo de brocas.

#### Diferencia en el Uso de Brocas

La diferencia entre la proyección sin optimización y la proyección con optimización representa la cantidad de brocas que se ahorran cada mes gracias a la implementación de mejoras.

#### Ahorro Mensual en dólares

El número de brocas ahorradas se multiplica por el valor de cada broca (\$30 dólares) para calcular el ahorro en dólares.

La tabla muestra los resultados de este cálculo mensual, destacando el número de brocas ahorradas y el ahorro económico asociado. La suma total del ahorro en dólares para todos los meses hasta finales del año es de \$7 680 dólares.

**Tabla 10**

Ahorro proyectado en brocas de perforación

Meses	Nº de brocas ahorradas	Ahorro (\$)
Agosto	47	1410
Septiembre	50	1500
Octubre	53	1590
Noviembre	55	1650
Diciembre	51	1530
Total		7680

Después de llevar a cabo la optimización en el proceso de perforación, los resultados son reveladores y demuestran un impacto considerable también en la vida útil de las barras de perforación. Estos hallazgos refuerzan la efectividad de la optimización en la operación de perforación.

**Determinación del costo por metro perforado en barras:**

Sin Optimización:

- Cada barra tiene un valor de \$105.

- La longitud total perforada antes de la optimización en promedio fue de 1186 pies.

$$\text{CostoTotal}_{\text{sinOptimizacion}} = \frac{105 \$}{1186} \text{ pies}$$

$$\text{CostoTotal}_{\text{sinOptimizacion}} = 0,0885 \text{ \$/pie}$$

Con Optimización:

- Cada barra tiene un valor de \$105.
- La longitud total perforada después de la optimización en promedio fue de 1327 pies.

$$\text{CostoTotal}_{\text{conOptimizacion}} = \frac{105 \$}{1327} \text{ pies}$$

$$\text{CostoTotal}_{\text{conOptimizacion}} = 0,0791 \text{ \$/pie}$$

Ahorro por Pie de Perforación con Optimización para una Barra:

$$= \text{CostoTotal}_{\text{sinOptimizacion}} - \text{CostoTotal}_{\text{conOptimizacion}} \dots \dots \dots (3)$$

$$\text{AhorroPorPie} = 0,0885 \text{ \$/pie} - 0,0791 \text{ \$/pie}$$

$$\text{AhorroPorPie} = 0,0094 \text{ \$/pie}$$

Para convertir el ahorro por pie de perforación a dólares por metro:

$$\text{AhorroPorMetro} = \text{AhorroPorPie} \times \frac{3,281 \text{ pies}}{1 \text{ metro}}$$

$$\text{AhorroPorMetro} = 0,0094 \text{ \$/pie} \times \frac{3,281 \text{ pies}}{1 \text{ metro}}$$

$$\text{AhorroPorMetro} = 0,0309 \text{ \$/metro}$$

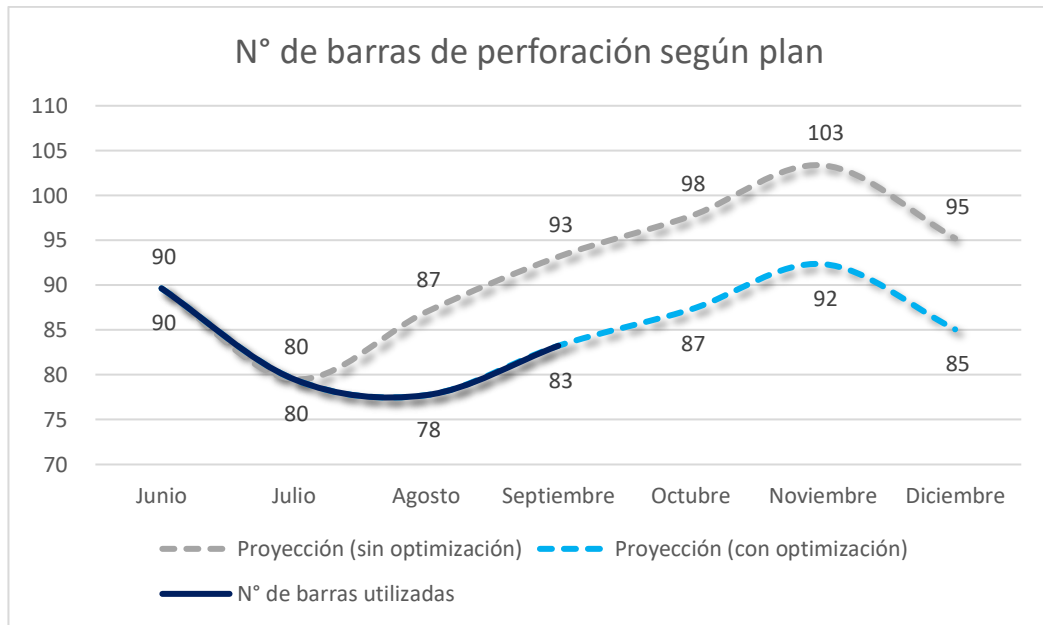
En términos de la vida útil de las barras de perforación, se observó un aumento significativo en su duración después de la optimización. La vida útil promedio de las barras de perforación sin optimización se mantuvo en 1 186 pies, lo que se traduce en una cantidad considerable de barras que necesitan ser reemplazadas con frecuencia. Sin embargo, después de la optimización, la vida útil promedio aumentó a 1 327 pies, lo que representa una extensión sustancial en la duración de las barras. Esta mejora es un indicativo claro de que la optimización ha reducido el desgaste de las barras de perforación, lo que a su vez conduce a una disminución en la necesidad de reemplazo.

En términos de ahorros, los datos arrojaron resultados que muestran un patrón de crecimiento en el número de barras ahorradas mes a mes, desde agosto hasta noviembre según lo proyectado, con una ligera disminución en diciembre esto guiado por el plan minero presentado anteriormente.

En cuanto a los ahorros, se proyecta un ahorro sustancial al final del año. Durante los meses de agosto a diciembre, se proyectan ahorrar un total de 50 barras de perforación después de la optimización. Esto se traduce en un ahorro de \$5 250 (50 barras x \$105 por barra) en términos de costos de reemplazo.

**Figura 10**

Grafica de la cantidad de barras a utilizarse



Los ahorros por metro perforado en aceros de perforación lo determinamos a continuación:

$$\text{Ahorro Total Por Metro} = \text{Ahorro en brocas} + \text{ahorros en barras} \dots (4)$$

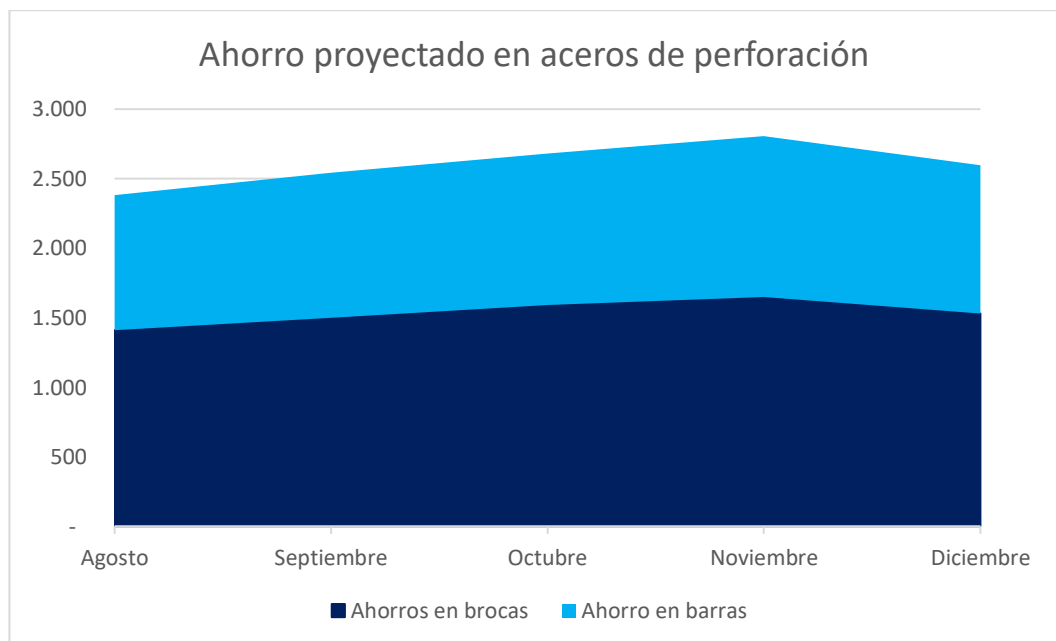
$$\text{Ahorro Total Por Metro} = 0,0453 \frac{\$}{\text{metro}} + 0,0309 \frac{\$}{\text{metro}}$$

$$\text{Ahorro Total Por Metro} = 0,0762 \frac{\$}{\text{metro}}$$

A continuación, la gráfica de áreas representa la proyección del ahorro acumulado generado por la optimización de la vida útil de los aceros de perforación tanto por las brocas como por las barras de perforación en los meses de agosto a diciembre. Estos ahorros ascienden a un total de \$12 930. Esta representación gráfica ilustra de manera efectiva el impacto conjunto de las estrategias de optimización en la reducción de costos operativos a lo largo del tiempo. La acumulación de áreas bajo la curva demuestra cómo las medidas de optimización han contribuido de manera continua a la disminución de los gastos, lo que subraya el éxito de estas estrategias en la operación de perforación.

### Figura 11

Gráfica del ahorro en cada mes



### 4.3. Contrastación de hipótesis

#### Sistema de Hipótesis

Hipótesis Nula (H0):

- La optimización de la vida útil de los aceros no tiene un efecto significativo en el rendimiento de la perforación.

H0:  $\mu_{\text{antes}} = \mu_{\text{después}}$ .....(5)

Hipótesis Alternativa (Ha):

- La optimización de la vida útil de los aceros tiene un efecto significativo en el rendimiento de la perforación.

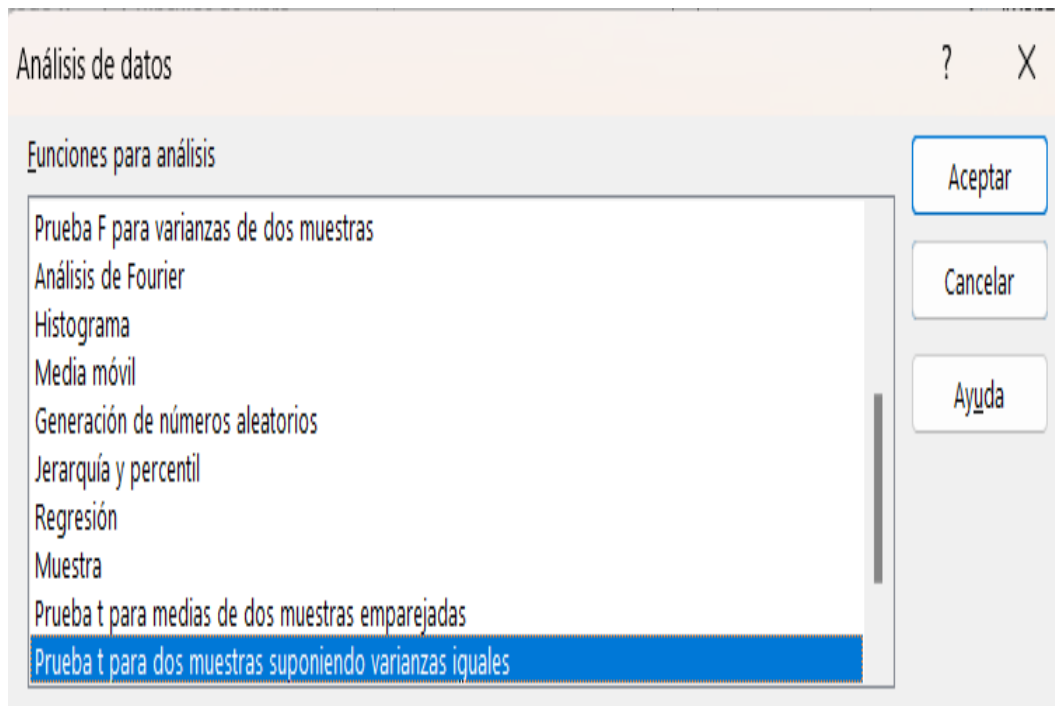
H0:  $\mu_{\text{antes}} \neq \mu_{\text{después}}$ .....(6)

Nivel de significancia ( $\alpha$ ) y nivel de Confianza ( $\gamma$ )

$$\alpha = 0,05 = 5\% \quad \gamma = 1 - \alpha = 95\%$$

**Figura 12**

Análisis de datos en Excel para prueba t para dos muestras suponiendo varianzas iguales



Nota. Captura de pantalla de Microsoft Excel.

**Figura 13**

Definición de variables

Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas iguales

Entrada

Rango para la variable 1:

Rango para la variable 2:

Diferencia hipotética entre las medias:

Rótulos

Alfa:

Opciones de salida

Rango de salida:

En una hoja nueva:

En un libro nuevo

Nota. Captura de pantalla de Microsoft Excel.

**Obteniendo la siguiente tabla:**

**Tabla 11**

Resultados de la prueba

	Longitud Perforado (pies)	Longitud Perforado (pies)
Media	327,4278215	384,5144357
Varianza	2228,436997	2826,602875
Observaciones	15	15
Varianza agrupada	2527,519936	
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	28	
Estadístico t	-3,109693762	
P(T<=t) una cola	0,002137342	
Valor crítico de t (una cola)	1,701130934	
P(T<=t) dos colas	0,004274684	
Valor crítico de t (dos colas)	2,048407142	

Media: Longitudes Promedio de Perforado Optimizado y sin Optimizar

Promedio longitud perforado pies sin optimización: (B001-B015) =  
327,4278215

Promedio longitud perforado pies optimizados: (B001-B015) =  
384,5144357

Varianza:  $\sigma^2 = (\sum (x-\mu)^2) / N$  .....(7)

Varianza 1: 2228,436997 Varianza 2: 2826,602875

Varianza Agrupada: Promedio Varianza 1 y Varianza 2 = 2527,519936

Grados de libertad:  $2n - 2 = 28$ .....(8)

Distribución estadística t:

$t = -3,0969376162852$

Observaciones: #Muestras (B001-B0015) = 15

P: Para determinar la probabilidad de que dos muestras puedan proceder de dos poblaciones subyacentes con igual media.

$P(T \leq t)$  una cola

=PRUEBA.T(L34:L48;P34:P48;1;2) : 0,00213734188145911

$P(T \leq t)$  dos colas

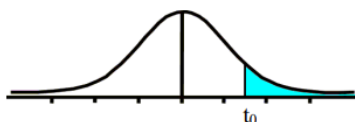
=PRUEBA.T(L34:L48;P34:P48;2;2) : 0,00427468376291822

El estadístico t calculado es -3,1097. Este valor se compara con el valor crítico de t de 2,0484 para un nivel de significancia del 0,05 y un grado de libertad específico.

## Tabla 12

### Tabla T Student 1 Cola

Tabla t-Student



Grados de libertad	0.25	0.1	0.05	0.025	0.01	0.005
1	1.0000	3.0777	6.3137	12.7062	31.8210	63.6559
2	0.8165	1.8856	2.9200	4.3027	6.9645	9.9250
3	0.7649	1.6377	2.3534	3.1824	4.5407	5.8408
4	0.7407	1.5332	2.1318	2.7765	3.7469	4.6041
5	0.7267	1.4759	2.0150	2.5706	3.3649	4.0321
6	0.7176	1.4398	1.9432	2.4469	3.1427	3.7074
7	0.7111	1.4149	1.8946	2.3646	2.9979	3.4995
8	0.7064	1.3968	1.8595	2.3060	2.8965	3.3554
9	0.7027	1.3830	1.8331	2.2622	2.8214	3.2498
10	0.6998	1.3722	1.8125	2.2281	2.7638	3.1693
11	0.6974	1.3634	1.7959	2.2010	2.7181	3.1058
12	0.6955	1.3562	1.7823	2.1788	2.6810	3.0545
13	0.6938	1.3502	1.7709	2.1604	2.6503	3.0123
14	0.6924	1.3450	1.7613	2.1448	2.6245	2.9768
15	0.6912	1.3406	1.7531	2.1315	2.6025	2.9467
16	0.6901	1.3368	1.7459	2.1199	2.5835	2.9208
17	0.6892	1.3334	1.7396	2.1098	2.5669	2.8982
18	0.6884	1.3304	1.7341	2.1009	2.5524	2.8784
19	0.6876	1.3277	1.7291	2.0930	2.5395	2.8609
20	0.6870	1.3253	1.7247	2.0860	2.5280	2.8453
21	0.6864	1.3232	1.7207	2.0796	2.5176	2.8314
22	0.6858	1.3212	1.7171	2.0739	2.5083	2.8188
23	0.6853	1.3195	1.7139	2.0687	2.4999	2.8073
24	0.6848	1.3178	1.7109	2.0639	2.4922	2.7970
25	0.6844	1.3163	1.7081	2.0595	2.4851	2.7874
26	0.6840	1.3150	1.7056	2.0555	2.4786	2.7787
27	0.6837	1.3137	1.7033	2.0518	2.4727	2.7707
28	0.6834	1.3125	1.7011	2.0484	2.4671	2.7633
29	0.6830	1.3114	1.6991	2.0452	2.4620	2.7564

Nota. Tabla de distribución de William Sealy Gosset.

### Interpretación de los Resultados

El valor del estadístico  $t$  (-3,1097) es menor que el valor crítico de  $t$  (2,0484) para un nivel de significancia del 0,05 y el grado de libertad correspondiente.

El valor p calculado para la prueba ( $P(T \leq t)$  dos colas) es 0,0043, que es menor que el nivel de significancia (alfa) de 0,05.

**Tabla 13**

Tabla T Student Área de dos colas

gl	ÁREA DE DOS COLAS						
	0,20	0,10	0,05	0,02	0,01	0,001	0,0001
1	3,078	6,314	12,706	31,821	63,657	636,619	6366,198
2	1,886	2,920	4,303	6,695	9,925	31,598	99,992
3	1,638	2,353	3,182	4,541	5,841	12,924	28,000
4	1,533	2,132	2,776	3,747	4,604	8,610	15,544
5	1,476	2,015	2,571	3,365	4,032	6,869	11,178
6	1,440	1,943	2,447	3,143	3,707	5,959	9,082
7	1,415	1,895	2,365	2,998	3,499	5,408	7,885
8	1,397	1,860	2,306	2,896	3,355	5,041	7,120
9	1,383	1,833	2,262	2,821	3,250	4,781	6,594
10	1,372	1,812	2,228	2,764	3,169	4,587	6,211
11	1,363	1,796	2,201	2,718	3,106	4,437	5,921
12	1,356	1,782	2,179	2,681	3,055	4,318	5,694
13	1,350	1,771	2,160	2,650	3,012	4,221	5,513
14	1,345	1,761	2,145	2,624	2,977	4,140	5,363
15	1,341	1,753	2,131	2,602	2,947	4,073	5,239
16	1,337	1,746	2,120	2,583	2,921	4,015	5,134
17	1,333	1,740	2,110	2,567	2,898	3,965	5,044
18	1,330	1,734	2,101	2,552	2,878	3,922	4,966
19	1,328	1,729	2,093	2,539	2,861	3,883	4,897
20	1,325	1,725	2,086	2,528	2,845	3,850	4,837
21	1,323	1,721	2,080	2,518	2,831	3,819	4,784
22	1,321	1,717	2,074	2,508	2,819	3,792	4,736
23	1,319	1,714	2,069	2,500	2,807	3,767	4,693
24	1,318	1,711	2,064	2,492	2,797	3,745	4,654
25	1,316	1,708	2,060	2,485	2,787	3,725	4,619
26	1,315	1,706	2,056	2,479	2,779	3,707	4,587
27	1,314	1,703	2,052	2,473	2,771	3,690	4,558
28	1,313	1,701	2,048	2,467	2,763	3,674	4,530
--	---	---	---	---	---	---	---

Nota. Tabla de distribución de William Sealy Gosset.

## **Hallazgos**

Con base en los resultados de la prueba, rechazamos la hipótesis nula ( $H_0$ ), que afirmaba que la optimización de la vida útil de los aceros no tiene un efecto significativo en el rendimiento de la perforación. En cambio, aceptamos la hipótesis alternativa ( $H_a$ ) que sugiere que la optimización de la vida útil de los aceros aumenta significativamente el rendimiento de la perforación.

## **Capítulo V**

### **Discusiones**

#### **5.1. Pruebas de validación del modelo experimental**

Uno de los aspectos fundamentales de esta investigación fue validar el modelo experimental diseñado para evaluar la optimización de la vida útil de los aceros de perforación. Los resultados obtenidos en los meses de agosto a diciembre indicaron un aumento significativo en la duración de las barras de perforación, así como en la eficiencia de las operaciones de perforación. Este hallazgo confirma la eficacia del enfoque de optimización aplicado en el proceso de perforación.

Las pruebas de validación también incluyeron un análisis de las brocas de perforación, que reveló una mejora sustancial en su rendimiento después de la optimización. La longitud perforada promedio aumentó significativamente, lo que demuestra la influencia positiva de las prácticas de mantenimiento preventivo y optimización. Estos resultados respaldan la validez del modelo experimental y subrayan la importancia de las estrategias implementadas.

#### **5.2. Aplicación de la tecnología encontrada**

La tecnología desarrollada y aplicada en esta investigación tiene un potencial significativo en la industria de la perforación. La optimización de la vida útil de los aceros de perforación, tanto brocas como barras, ha demostrado ser una

estrategia efectiva para reducir los costos operativos y mejorar el rendimiento en las operaciones mineras y de construcción.

La capacitación del personal en el uso adecuado de los aceros de perforación, el mantenimiento preventivo de equipos y la gestión de recursos críticos son prácticas que pueden implementarse en una amplia gama de proyectos de perforación en todo el mundo. La tecnología y enfoques desarrollados en esta investigación son transferibles y aplicables en diversos contextos, lo que representa una oportunidad valiosa para aumentar la eficiencia y la sostenibilidad en la industria.

### **5.3. Contraste con trabajos de investigación similares**

La investigación realizada en este estudio se basó en la optimización de la vida útil de los aceros de perforación, un tema relevante en la industria minera y de construcción. Al comparar los resultados con trabajos de investigación similares, se puede observar que la aplicación de estrategias de optimización ha demostrado ser consistente en la mejora del rendimiento de los aceros de perforación.

Estudios previos han destacado la importancia de la capacitación del personal, el mantenimiento preventivo y la gestión eficiente de recursos en el alargamiento de la vida útil de los aceros. Los hallazgos se alinean con estos trabajos y respaldan la noción de que estas estrategias son esenciales para la eficiencia operativa.

## **Conclusiones**

### **1. Optimización de la vida útil de los aceros de perforación**

La optimización de la vida útil de las brocas y las barras de perforación ha demostrado ser altamente efectiva, con un aumento del 18% en la longitud perforada por las brocas y un incremento del 12% en la vida útil promedio de las barras de perforación. Estas mejoras se tradujeron en un ahorro económico acumulado de \$12 930 durante los meses de agosto a diciembre, guiados por el plan minero. Esto se relaciona directamente con el objetivo general de incrementar la vida útil de los aceros de perforación.

### **2. Impacto de los factores de mantenimiento**

La capacitación adecuada del personal en el uso de aceros de perforación, junto con la implementación de prácticas de mantenimiento preventivo, son aspectos fundamentales para prolongar la vida útil de estos materiales y maximizar su eficiencia en el proceso de perforación. Esto se alinea con el objetivo específico de determinar la incidencia de los factores de mantenimiento.

### **3. Impacto de los factores operacionales**

La gestión eficiente de recursos críticos, como el suministro de aire con presión adecuada y el acceso a agua para la lubricación, es esencial para

garantizar un rendimiento óptimo en las operaciones de perforación con Jackleg. Esto se relaciona con el objetivo específico de determinar la incidencia de los factores operacionales.

#### 4. Evaluación del rendimiento con medidas de control

Los datos recopilados respaldan la hipótesis de que la optimización de la vida útil de los aceros de perforación tiene un impacto significativo en el rendimiento de la perforación, lo que subraya la importancia de implementar estas estrategias en la industria. Esto se conecta con el objetivo específico de evaluar el rendimiento de perforación con la implementación de medidas de control y procedimientos de trabajo.

## **Recomendaciones**

1. Continuar con la implementación de las estrategias de optimización en las operaciones de perforación, asegurando la capacitación continua del personal y el seguimiento de prácticas de mantenimiento preventivo.
2. Mantener un monitoreo constante de la vida útil de las brocas y barras de perforación para evaluar el impacto de las mejoras a lo largo del tiempo y realizar ajustes según sea necesario.
3. Evaluar el impacto a largo plazo de la optimización de la vida útil de los aceros de perforación en una variedad de contextos y proyectos, lo que permitiría una comprensión más completa de su efectividad y beneficios a largo plazo en futuras investigaciones.

## Referencias Bibliográficas

Aparco, A., & García, J. (2019). Optimización de la vida útil de los aceros de perforación para la reducción de costos en mina San Vicente -CIA. San Ignacio de Morocha S.A.A. año 2018. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Huancavelica].

<https://apirepositorio.unh.edu.pe/server/api/core/bitstreams/79e7095b-46dc-4bee-8f62-59ca6e3a021b/content>

Arroyo, Y., & Asto, Y. (2023). Aplicación del método de minado corte y relleno ascendente en la veta escondida, Minera Vicus S.A.C. [Tesis de pregrado, Universidad Continental]. <https://hdl.handle.net/20.500.12394/12761>

Bernaola, J., Castilla, J., & Herrera, J. (2013). Perforación y voladura de rocas en minería. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.  
[https://oa.upm.es/21848/8/20131007\\_PERFORACION\\_Y\\_VOLADURA.pdf](https://oa.upm.es/21848/8/20131007_PERFORACION_Y_VOLADURA.pdf)

Camarena, A. (2019). Optimización de los rendimientos de perforación a partir del modelo geotécnico con fines de minimizar costos de perforación en la Compañía Minera Antamina. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional del Centro del Perú]. <http://hdl.handle.net/20.500.12894/4966>

- Carvajal, J., Rodríguez, C., Patiño, C., & Guevara, F. (2015). Desarrollo e implementación de un nuevo plan de mantenimiento para equipos de perforación diamantina. [Tesis de pregrado, Universidad de Cuenca]. <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/23885>
- Chirinos, A. (2015). Control de aceros de perforación, factores que influyen la vida útil, su relación con el paralelismo y profundidad en el proyecto de expansión K-115 JJC contratistas generales S.A. sociedad minera Cerro Verde. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de San Agustín]. <https://repositorioslatinoamericanos.uchile.cl/handle/2250/3258237>
- Concha, E. (2020). Definición macizo rocoso. <https://pt.scribd.com/document/473800176/Definicion-macizo-rocoso#>
- Díaz, J., & Iguavita, C. (2018). Evaluación técnica y financiera del mejoramiento en la calidad del hueco mediante la implementación de brocas con calibre extendido en la fase de 12 ¼” en el campo Castilla. [Tesis de pregrado, Fundación Universidad de América]. <https://hdl.handle.net/20.500.11839/6744>
- Echevarria, C. (2006). Informe de geotécnica del proyecto construcción de túneles correas. <https://es.scribd.com/document/496856606/Investigacion-geotecnica-en-obras-civiles-TUNELES>

Escudero, M. (2021). Caracterización y mejora de los rendimientos de las flotas de perforación en mina El Soldado. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Chile]. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/182983>

EXSA. (2019). Manual práctico de voladura.

[https://www.academia.edu/14518880/Manual\\_de\\_voladura](https://www.academia.edu/14518880/Manual_de_voladura)

Famesa Explosivos S.A. (2019). Manual de perforación y voladura. Biblioteca Nacional del Perú.

[https://oa.upm.es/21848/8/20131007\\_PERFORACION\\_Y\\_VOLADURA.pdf](https://oa.upm.es/21848/8/20131007_PERFORACION_Y_VOLADURA.pdf)

Feijoo, E., & Arias, J. (2023). Optimización del diseño de malla de perforación subterránea en el frente de avance 70 de la mina PROMINE, Camilo Ponce Enríquez – Azuay. [Tesis de pregrado, Universidad del Azuay]. <http://dspace.uazuay.edu.ec/handle/datos/13081>

Flores, A. (2019). Aplicación del método de perforación horizontal dirigida, para incrementar la productividad de la instalación de líneas de agua en el proyecto de saneamiento Nicolás de Piérola, Santa Clara Sur. [Tesis de pregrado, Universidad Tecnológica del Perú]. <https://hdl.handle.net/20.500.12867/3313>

- García, I. (2016). Daño a las barrenas, su implicación en la perforación y soluciones propuestas. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Autónoma de México].  
<http://132.248.52.100:8080/xmlui/handle/132.248.52.100/10401>
- González, D. (2016). Evaluación de los parámetros de perforación en barrenos y correlación con la geología del terreno. [Proyecto fin de grado, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas y Energía].  
<https://oa.upm.es/40237/>
- Herrera, J., & Castilla, J. (2013). Perforación y voladura de rocas en minería. Universidad Politécnica de Madrid.
- Hurtado, J. (2000). Metodología de la investigación holística (tercera ed.). SYPAL. <https://www.urbe.edu/UDWLibrary/InfoBook.do?id=9876>
- INACAP. (2014). Extracción Minera I: Apuntes Perforación. Universidad Tecnológica de Chile. [http://www.inacap.cl/web/material-apoyo-cedem/alumno/Mineria-y-Geomatica/AAI\\_OPEX01\\_Material\\_Extraccion\\_Mina\\_I\\_Perforacion.pdf](http://www.inacap.cl/web/material-apoyo-cedem/alumno/Mineria-y-Geomatica/AAI_OPEX01_Material_Extraccion_Mina_I_Perforacion.pdf)
- Manobanda, D. (2021). Estudio de optimización técnica y económica para el diseño y ejecución en la perforación del pozo Sansahuari (SNSB-01), aplicando la metodología visualización, conceptualización, definición,

- seguimiento y evaluación – VCDSE. [Tesis de pregrado, Universidad Central del Ecuador]. <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/24449>
- MINEM. (2023). Boletín Estadístico Minero Abril 2023. Ministerio de Energía y Minas. <https://www.gob.pe/institucion/minem/informes-publicaciones/4286097-boletin-estadistico-minero-abril-2023>
- PDVSA. (2016). El taladro de perforación. [http://www.pdvs.com/images/pdf/armables/Taladro\\_de\\_perforacion.pdf](http://www.pdvs.com/images/pdf/armables/Taladro_de_perforacion.pdf)
- Quito, J., & Babilonia, R. (2020). Análisis de la vida útil de aceros de perforación para evaluar costos operativos en galerías Compañía Minera San Cristobal S.A.A. [Tesis de pregrado, Universidad Continental]. <https://hdl.handle.net/20.500.12394/8523>
- Ricse, K. (2020). Diseño de malla de perforación y voladura para mejorar la fragmentación de roca en mina Paola de compañía minera san lucas S.A.C. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional del Centro del Perú]. <https://repositorio.uncp.edu.pe/handle/20.500.12894/6191>
- Sánchez, E. (2022). Optimización de brocas de perforación en el crucero 746, para reducir costos operativos en la mina Coriloma - Apurímac-2019. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Micaela Bastidas De Apurímac]. <https://repositorio.unamba.edu.pe/handle/UNAMBA/1083>

- Sonami. (2016). Perforación y tronadura. Guía de operaciones para la pequeña minera. <https://www.sonami.cl/v2/wp-content/uploads/2016/03/6.perforacion-y-tronadura.pdf>
- Ticllasuca, E. (2019). Planeamiento de minado a corto plazo para optimizar la producción en la Unidad Minera Pallancata de Hochschild Mining SA. [Tesis de pregrado, Universidad Continental]. <https://repositorio.continental.edu.pe/handle/20.500.12394/7022>
- Zahariadis, T., Papadakis, A., Alvarez, F., Gonzalez, J., Lopez, F., & Facca, F. (2015). Managing Resources and Services in a Cloud Federation Supporting Future Internet Applications. IEEE/ACM 7th International Conference on Utility and Cloud Computing, 792-799. <https://doi.org/10.1109/UCC.2014.129>
- Zapana, J. (2022). Influencia de los factores técnicos - operacionales en el rendimiento de los aceros de perforación usados en las labores de desarrollo en la Unidad Minera Huancapeti. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco]. <http://hdl.handle.net/20.500.12918/7050>

## **Anexos**

### Anexo 1: Matriz de consistencia

Problema general	Objetivo general	Hipótesis general	Variables
¿Cómo inciden los factores de mantenimiento de los aceros de perforación en el rendimiento de perforación en los frentes de avance de una mina subterránea del norte del Perú?	Determinar la incidencia de los factores de mantenimiento de los aceros de perforación en el rendimiento de perforación en los frentes de avance de una mina subterránea del norte del Perú.	El incremento de la vida útil de los aceros de perforación aumenta del rendimiento de perforación en los frentes de avance de una mina subterránea del norte del Perú	Independiente Vida útil de los aceros de perforación. Se refiere a los metros perforados de cada accesorio que conforma la sarta o columna de perforación, evaluando el control y procedimiento de la operación de perforación.
¿Cómo inciden los factores operacionales en el uso de los de los aceros de perforación en el rendimiento de perforación en los frentes de avance de una	Determinar la incidencia de los factores operacionales en el uso de los de los aceros de perforación en el rendimiento de perforación en los frentes de	Hipótesis específicas Los factores operacionales en el uso de los de los aceros de perforación inciden en el rendimiento de perforación en los frentes de avance de una	Dependiente Rendimiento de perforación en frentes de avance

mina subterránea del norte del Perú?	avance de una mina subterránea del norte del Perú.	mina subterránea del norte del Perú	Se refiere a los indicadores de rendimiento resultante de la perforación con equipos y uso de aceros de perforación dentro de una escala de tiempo
¿Existe relación entre el rendimiento de perforación en los frentes de avance con la implementación de medidas de control y procedimientos de trabajo que incrementen la vida útil de los aceros de perforación?	Evaluar el rendimiento de perforación en los frentes de avance con la implementación de medidas de control y procedimientos de trabajo que incrementen la vida útil de los aceros de perforación.	El rendimiento de perforación en los frentes de avance aumenta con la implementación de medidas de control y procedimientos de trabajo que incrementen la vida útil de los aceros de perforación.	

### Vida útil de barras de perforación sin optimización

	Longitud Perforado (m)	Longitud Perforado (pies)
Ba01	365	1,198
Ba02	358	1,175
Ba03	401	1,316
Ba04	354	1,161
Ba05	378	1,240
Ba06	332	1,089
Ba07	352	1,155
Ba08	400	1,312
Ba09	338	1,109
Ba10	337	1,106
Promedio		1,186

### Vida útil de barras de perforación optimizado

	Longitud Perforado (m)	Longitud Perforado (pies)
Ba01	412	1,352
Ba02	376	1,234
Ba03	380	1,247
Ba04	382	1,253
Ba05	436	1,430
Ba06	431	1,414
Ba07	410	1,345
Ba08	394	1,293
Ba09	421	1,381
Ba10	404	1,325
Promedio		1,327