



Universidad Católica de Santa María

Facultad de Ciencias e Ingenierías Físicas y Formales

Escuela Profesional de Ingeniería de Minas

**Optimización del rendimiento en la etapa de perforación DTH mediante la
aplicación de indicadores de rendimiento (KPIS) para la reducción de
costos operativos en la unidad minera de Apurímac durante los periodos
2023-2024**

Tesis presentada por:

Arenas Manrique, Renato Rafael

ORCID: 0009-0004-6423-7258

para optar el Título Profesional de Ingeniero de Minas

Asesor:

Mg. Linares Flores Castro, Antonio Erick

ORCID: 0000-0003-0506-2297

Arequipa – Perú

2026

UCSM-ERP

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

INGENIERIA DE MINAS

TITULACIÓN CON TESIS

DICTAMEN APROBACIÓN DE BORRADOR

Arequipa, 15 de Marzo del 2026

Dictamen: 014039-C-EPIM-2026

Visto el borrador del expediente 014039, presentado por:

2012700181 - ARENAS MANRIQUE RENATO RAFAEL

Titulado:

**OPTIMIZACIÓN DEL RENDIMIENTO EN LA ETAPA DE PERFORACIÓN DTH MEDIANTE LA
APLICACIÓN DE INDICADORES DE RENDIMIENTO (KPIs) PARA LA REDUCCIÓN DE COSTOS
OPERATIVOS EN LA UNIDAD MINERA DE APURÍMAC DURANTE LOS PERIODOS 2023-2024**

Nuestro dictamen es:

APROBADO

Título Profesional/Título de Segunda Especialidad/Grado Académico a optar:

INGENIERO DE MINAS

**29688402 - BARREDA DE LA CRUZ MIGUEL ALBERTO
DICTAMINADOR**



**40379481 - PAREDES SALAS OMAR WILLY
DICTAMINADOR**



**29635304 - MORALES VALDIVIA JAVIER ANTONIO
DICTAMINADOR**



OPTIMIZACIÓN DEL RENDIMIENTO EN LA ETAPA DE PERFORACIÓN DTH MEDIANTE LA APLICACIÓN DE INDICADORES DE RENDIMIENTO (KPIs) PARA LA REDUCCIÓN DE COSTOS OPERATIVOS EN LA UNIDAD MINERA DE APURÍMAC DURANTE L

INFORME DE ORIGINALIDAD

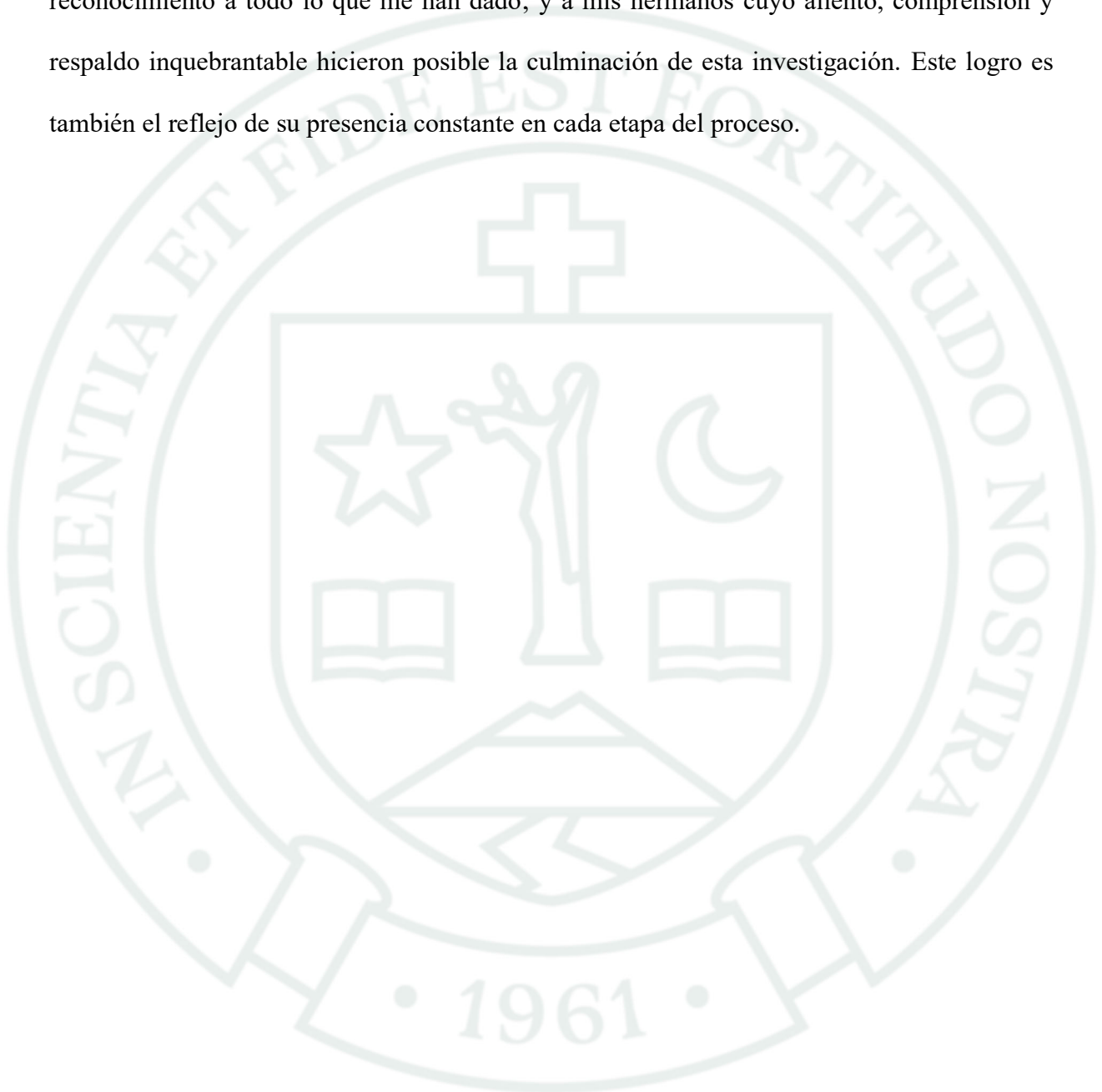
14%	12%	3%	5%
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	Submitted to Universidad Católica de Santa María	2%
	Trabajo del estudiante	
2	repositorio.upn.edu.pe	1%
	Fuente de Internet	
3	hdl.handle.net	1%
	Fuente de Internet	
4	www.dspace.uce.edu.ec	1%
	Fuente de Internet	
5	dspace.espol.edu.ec	1%
	Fuente de Internet	
6	www.coursehero.com	1%
	Fuente de Internet	
7	alicia.concytec.gob.pe	<1%
	Fuente de Internet	
8	repositorio.undac.edu.pe	<1%
	Fuente de Internet	
9	apirepositorio.unh.edu.pe	<1%
	Fuente de Internet	
10	1library.co	<1%
	Fuente de Internet	

DEDICATORIA

A mis padres, por su apoyo incondicional, su sacrificio constante y la fe depositada en mí a lo largo de este camino académico. A ellos dedico este trabajo como modesto reconocimiento a todo lo que me han dado; y a mis hermanos cuyo aliento, comprensión y respaldo inquebrantable hicieron posible la culminación de esta investigación. Este logro es también el reflejo de su presencia constante en cada etapa del proceso.



RESUMEN

El objetivo general de esta investigación es aplicar indicadores de rendimiento (KPIs) para reducir los costos operativos en la etapa de perforación DTH de la unidad minera de Apurímac durante 2023-2024. Adicionalmente, la metodología empleada es de tipo aplicada, cuantitativa, transversal y correlacional, con un diseño descriptivo que incluye recopilación de datos históricos y proyecciones experimentales; la muestra es intencional no probabilística, conformada por el área de perforación en coordenadas $14^{\circ}5'56.48''$ S, $72^{\circ}19'11.21''$ W, y los instrumentos utilizados abarcan hojas de registro operativo, bases de datos en Excel para análisis de los mismos. Así mismo, los resultados principales revelan mejoras en KPIs como el aumento de la utilización del 51.1% al 72.0%, la tasa de penetración (ROP) de 25.69 m/h a 31.13 m/h, y un incremento del 44.9% en metros perforados (de 480,417 m a 696,133 m), proyectando reducciones de costos del 12-15%. En conclusión, la aplicación de KPIs optimiza el proceso de perforación, confirma la hipótesis de reducción significativa de costos y fomenta una gestión proactiva para mayor eficiencia y rentabilidad en la unidad minera.

Palabras clave: KPIs, perforación DTH, costos.

ABSTRACT

The overall objective of this research is to apply key performance indicators (KPIs) to reduce operating costs in the DTH drilling stage of the Apurímac mining unit during 2023-2024. Additionally, the methodology used is applied, quantitative, cross-sectional, and correlational, with a descriptive design that includes historical data collection and experimental projections; The sample is intentional non-probabilistic, consisting of the drilling area at coordinates $14^{\circ}5'56.48''$ S, $72^{\circ}19'11.21''$ W, and the instruments used include operational record sheets and Excel databases for analysis. Likewise, the main results reveal improvements in KPIs such as an increase in utilization from 51.1% to 72.0%, an increase in the rate of penetration (ROP) from 25.69 m/h to 31.13 m/h, and a 44.9% increase in meters drilled (from 480,417 m to 696,133 m), projecting cost reductions of 12-15%. In conclusion, the application of KPIs optimizes the drilling process, confirms the hypothesis of significant cost reduction, and encourages proactive management for greater efficiency and profitability in the mining unit.

Keywords: KPIs, DTH drilling, costs.

ÍNDICE

DEDICATORIA

RESUMEN

ABSTRACT

INTRODUCCIÓN 1

CAPÍTULO I 3

1. PLANTAMIENTO DEL PROBLEMA 4

1.1. Descripción de la situación problemática..... 4

1.2. Objetivo del proyecto 6

1.2.1. Objetivo General..... 6

1.2.2. Objetivos Específicos..... 6

1.3. Hipótesis 7

1.4. Justificación 7

1.5. Líneas de investigación del trabajo 8

1.6. Variables 9

1.6.1. Variable independiente X: Indicadores de Rendimiento KPI's 9

1.6.2. Variable independiente Y: Reducción de los costos operativos 10

CAPÍTULO II 13

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS 14

2.1. Antecedentes de la investigación 14

2.1.1. Antecedentes internacionales.....	14
2.1.2. Antecedentes nacionales	16
2.2. Bases teóricas del proyecto.....	18
2.3. Marco conceptual.....	21
CAPÍTULO III.....	23
3. MARCO METODOLÓGICO	24
3.1. Alcances y Limitaciones	24
3.1.1. Alcances.....	24
3.1.2. Limitaciones.....	25
3.2. Aporte.....	26
3.3. Tipo y nivel de la investigación.....	27
3.3.1. Tipo de investigación.....	27
3.3.2. Nivel de investigación.....	27
3.4. Población y muestra.....	28
3.4.1. Población.....	28
3.4.2. Muestra	28
3.4.3. Muestreo	28
3.5. Metodología experimental	29
3.5.1. Procedimiento experimental de la investigación	29
3.5.2. Materiales.....	30
3.5.3. Indicadores de rendimiento KPI's	30

3.6.	Técnicas e instrumentos de recolección de datos	32
3.7.	Técnicas de análisis	34
3.8.	Procesamiento de datos	35
3.8.1.	Procesamiento Estadístico	35
CAPÍTULO IV.....		36
4.	RESULTADOS	37
4.1.	Identificación y Evaluación de los Indicadores de Rendimiento (KPIs) Utilizados Actualmente en la Etapa de Perforación de la Unidad Minera de Apurímac	37
4.1.1.	Identificación de los Kpis Utilizados en la Etapa de Perforación	37
4.1.2.	Evaluación Histórica de los Indicadores Operativos Base (Enero 2022 – Abril) 2023.....	38
4.1.3.	Comportamiento de la Productividad Mensual y Metros Perforados.....	40
4.1.4.	Evaluación de la Velocidad de Perforación por Equipo.....	41
4.1.5.	Evaluación de Horas Operativas e Incidencia en el Desempeño.....	42
4.1.6.	Evaluación de los Kpis Operativos Actuales Frente a sus Metas (Mayo – Diciembre 2023)	43
4.1.7.	Evaluación del Cumplimiento de Producción y Metas Mensuales.....	45
4.2.	Optimización de la Etapa de Perforación de la Unidad Minera de Apurímac entre los Periodos 2023 – 2024	48
4.2.1.	Comparación de los Indicadores Operativos Antes y Después del Proceso de Optimización.....	49
4.2.2.	Evolución de la Producción Mensual y del Rendimiento de Perforación.....	51

4.2.3. Incremento del Rendimiento por Hora y Mejora en la Capacidad de Perforación.....	52
4.2.4. Influencia del Número de Equipos en la Optimización del Proceso.....	53
4.2.5. Evaluación de Cumplimiento Frente a Budget, Contrato y Meta Interanual.....	54
4.3. Análisis Económico del Costo Ideal, Costo Real y Reducción de Costos de Operación del Efecto de la Optimización de la Etapa de Perforación de la Unidad Minera de Apurímac entre los Periodos 2023-2024	57
4.3.1. Base Económica del Análisis.....	57
4.3.2. Determinación del Escenario Real y del Escenario Ideal.....	59
4.3.3. Evaluación del Desempeño Económico Frente al Budget, Contrato p Plan Mensual.....	60
4.3.4. Análisis de la Valorización Mensual y Comportamiento de la Brecha Económica.....	61
4.4. Discusión de resultados.....	63
CONCLUSIONES	68
RECOMENDACIONES.....	71
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	73

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Operacionalización de las Variables a estudiar	11
Tabla 2. Indicadores operativos base (enero 2022-abril 2023).....	39
Tabla 3. Metros ejecutados-varolizable	41
Tabla 4. Velocidad de perforación.....	42
Tabla 5. Horas operativas.....	43
Tabla 6. Evaluación de KPIs de mayo a diciembre del 2023	44
Tabla 7. Cumplimiento de producción de mayo a diciembre de 2023	46
Tabla 8. Comparación de KPIs operativos entre el periodo base y el periodo optimizado	50
Tabla 9. Producción ejecutada y cumplimiento del plan mensual en el periodo mayo – diciembre 2023.....	51
Tabla 10. Comportamiento mensual del ROP y producción ejecutada, mayo – diciembre 2023.....	53
Tabla 11. Evolución de equipos operativos y metros valorizables, mayo – diciembre 2023 .	54
Tabla 12. Cumplimiento acumulado del periodo optimizado mayo – diciembre 2023	55
Tabla 13. Resumen económico comparativo entre el periodo base y el periodo optimizado.	58
Tabla 14. Escenario económico real e ideal del periodo mayo – diciembre 2023.....	59
Tabla 15. Brecha económica según referencias de control, mayo – diciembre 2023	60
Tabla 16. Evolución de la valorización mensual del periodo optimizado	61

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Secuencia de las operaciones unitarias en minería.....	18
Figura 2. Acciones de la perforación rotopercutiva (DTH).....	19
Figura 3 Velocidad de perforación promedio.....	40



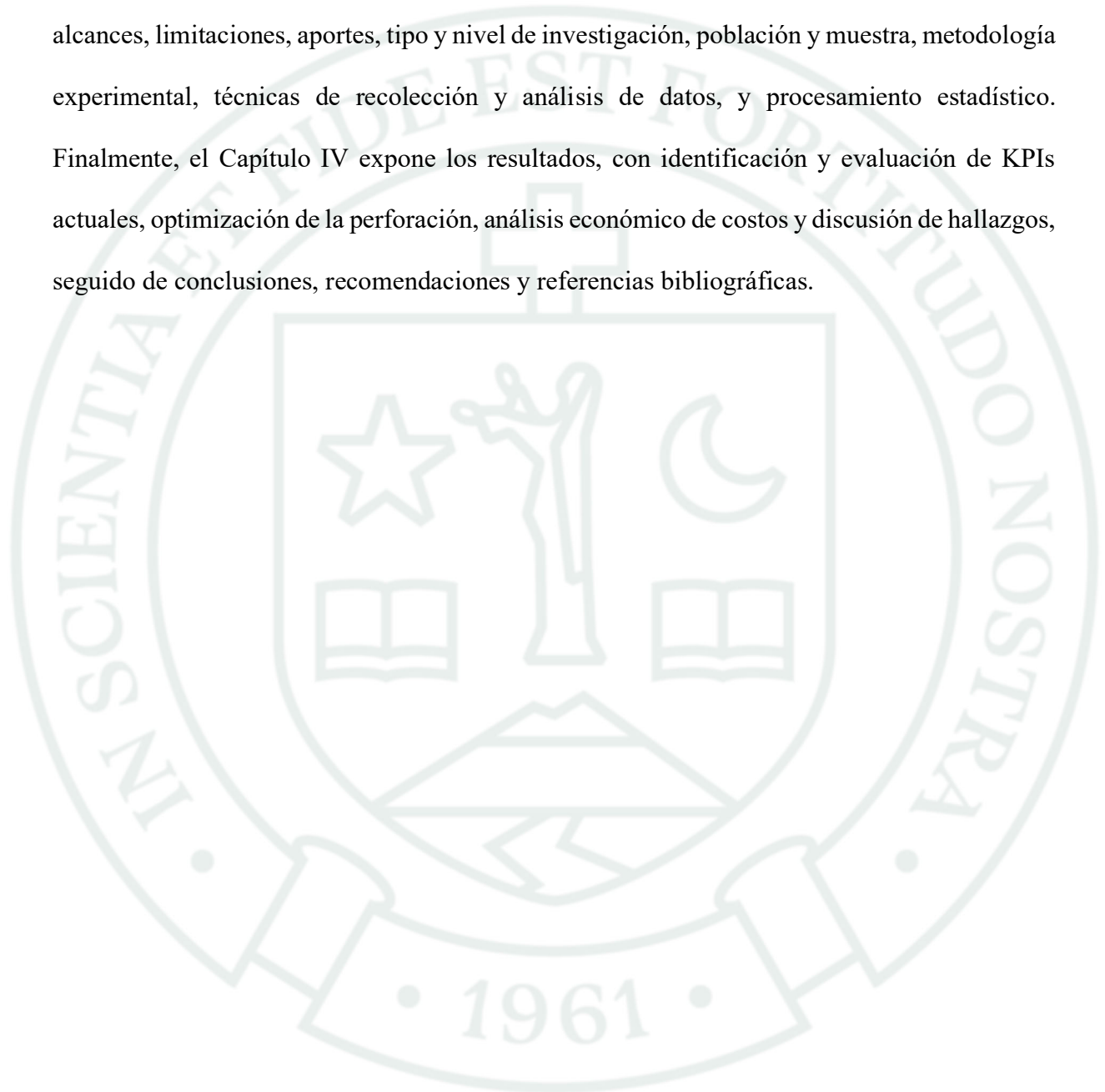
INTRODUCCIÓN

La industria minera representa un pilar fundamental en la economía peruana, contribuyendo significativamente al PIB y al empleo en regiones como Apurímac, donde las operaciones extractivas enfrentan desafíos constantes para mantener la competitividad en un mercado global volátil. En particular, la etapa de perforación DTH (Down-The-Hole) es un proceso crítico en la explotación de yacimientos, ya que determina la eficiencia general de la producción y el cumplimiento de metas ambientales y de seguridad. Sin embargo, en la unidad minera de Apurímac, esta fase ha mostrado ineficiencias que impactan directamente en los costos operativos, como el desgaste prematuro de equipos, el consumo excesivo de energía y el tiempo perdido por fallos mecánicos, lo que subraya la necesidad de enfoques innovadores para elevar el rendimiento y asegurar la sostenibilidad a largo plazo durante los periodos 2023-2024.

La implementación de indicadores de rendimiento clave (KPIs) emerge como una herramienta estratégica para abordar estas limitaciones, permitiendo medir y mejorar aspectos cuantificables como la tasa de penetración por hora, el índice de utilización de maquinaria y el consumo de brocas por metro perforado. En el contexto de Apurímac, donde los costos operativos representan hasta el 40% del presupuesto total de extracción, la optimización mediante KPIs no solo busca minimizar desperdicios, sino también fomentar una cultura de mejora continua entre los operarios y gerentes. Este enfoque, alineado con prácticas modernas de gestión minera, podría traducirse en reducciones significativas de gastos, potenciando la rentabilidad de la unidad sin comprometer la calidad de los procesos, y adaptándose a las particularidades geológicas y logísticas de la región andina.

Esta investigación se estructura en cuatro capítulos principales que guían el desarrollo del proyecto. El Capítulo I presenta el planteamiento del problema, incluyendo la descripción

de la situación, objetivos generales y específicos, hipótesis, justificación, líneas de investigación y variables independientes como los KPIs y la reducción de costos operativos. El Capítulo II aborda los fundamentos teóricos, con antecedentes internacionales y nacionales, bases teóricas y el marco conceptual. El Capítulo III detalla el marco metodológico, cubriendo alcances, limitaciones, aportes, tipo y nivel de investigación, población y muestra, metodología experimental, técnicas de recolección y análisis de datos, y procesamiento estadístico. Finalmente, el Capítulo IV expone los resultados, con identificación y evaluación de KPIs actuales, optimización de la perforación, análisis económico de costos y discusión de hallazgos, seguido de conclusiones, recomendaciones y referencias bibliográficas.





CAPÍTULO I

Plantamiento del Problema

1.1. Descripción de la Situación Problemática

El sector minería es una de las industrias fundamentales en el desarrollo económico en el país, sino que también esencial para otros sectores clave como la manufactura, construcción y energía. Razón por la cual es de crucial importancia una ejecución y operación más efectiva para sacar la mayor rentabilidad

Dentro una unidad minera existe una serie de operaciones y procesos unitarios que se deben ejecutar para el procesamiento del mineral, entre todas las etapas, se presenta la etapa de la perforación que se basa en lograr alcanzar y liberar el material mineralizado que se encuentra contenido en la roca, todo esto a través de la realización de agujeros en el terreno, específicamente estos agujeros son identificados previamente mediante otros estudios. Si bien es cierto esta etapa puede resultar simple y sencilla frente a otras actividades, no necesariamente puede resultar así, debido a que una mala planificación, operación y ejecución puede resultar crítica y conlleva a otros efectos negativos como el uso excesivo de explosivos, una baja efectividad en la extracción del mineral, la misma seguridad del proceso, e incluso un impacto negativo del medio ambiente, la seguridad de los propios trabajadores y efectivamente un impacto exponencial económico. Razón por la cual, muchas de las empresas destinan la mayoría de sus esfuerzos en una supervisión y monitoreo constante de todas sus operaciones, en donde implementan una serie de mecanismos, operaciones y actividades con el principal objetivo de reducir los costos y de la misma forma dar el cumplimiento de las metas planificadas y proyectada de la empresa minera.

Para evaluar la efectividad o eficiencia de una actividad, sistema o proceso se emplean indicadores de rendimiento (Key Performance Indicators en “KPI’s” sus siglas de inglés) que se basa en la medición del cumplimiento de los objetivos establecidos y dar el seguimiento del

progreso de dicha actividad, este tipo de herramienta es preferida en todas las organizaciones para el monitoreo del desempeño ya que proporcionan la información rápida y precisa de un rendimiento actual con un propósito requerido para lograr alcanzar los objetivos propuestos, sin embargo la aplicación de KPI resultan efectivos siempre y cuando se aplique un KPI apropiado que asocie cada objetivo de forma completa, por lo contrario una mala elección de KPI puede resultar redundante, consumir muchos esfuerzos y recursos de la empresa, por lo que resulta esencial una elección adecuada de indicadores ya que esto con lleva una toma de decisión que va repercutir los costos operativos de la mina.

Concretamente en la unidad minera de Apurímac, especializada en la extracción de cobre y subproductos como oro, plata y molibdeno. Del tipo de mina de cielo abierto con una capacidad instalada de mas de 400 000 TM de cobre en concentrado anualmente. En el desarrollo de todas sus operaciones se ha identificado en las actividades de perforación diferentes problemáticas que afectan los costos operativos de la mina, los cuales son el consumo excesivo de las brocas, la mala elección de las brocas que esta acondicionado al tipo de roca con el que se interactúa, por otro lado, existe también la limitación por el personal, por ejemplo la habilidad del operador al emplear los martillos neumático donde realizan una inadecuada maniobrabilidad provocando un desgaste prematuro de las brocas e incluso a la ruptura o quiebre de este, que a su vez conduce a tiempos improductivos entre otros factores, al no tener un adecuado de control esto induce efectos en los costos operativos.

Asimismo, se identificó un cambio operacional relevante durante el año 2023. Hasta abril de dicho año, la unidad minera realizaba la perforación con brocas de diámetro 6 1/8'', bajo la gestión directa de MMG. Sin embargo, a partir de mayo de 2023, se terceriza la operación con la empresa OWM, modificándose el diámetro de perforación a 5''. Este cambio implica nuevas condiciones técnicas que afectan la tasa de penetración, el consumo de brocas

y la productividad del equipo; no habiéndose evaluado aún su impacto económico y operativo. La ausencia de un análisis comparativo basado en indicadores de rendimiento ha limitado una adecuada toma de decisiones en la selección del diámetro óptimo de broca para la reducción de costos operativos.

De acuerdo a lo expuesto anteriormente, es como se desarrolla este trabajo de investigación que pretende abordar dicha problemática mediante la aplicación de indicadores de rendimiento (KPI's) en la etapa de perforación para establecer una medición y control de los parámetros de perforación para la disminución de costos operativos de la unidad minera de Apurímac, facilitando el procesamiento de datos vinculados a estas operaciones, obteniendo una visualización más clara y fácil de interpretar, lo que permite detectar problemas en las operaciones y ofrecer soluciones rápidas para un mejoramiento continuo y optimización en dicha etapa.

1.2. Objetivo del Proyecto

1.2.1. *Objetivo General*

Aplicar indicadores de rendimiento para la reducción de costos de operación en la etapa de perforación de la unidad minera de Apurímac entre los periodos 2023 – 2024.

1.2.2. *Objetivos Específicos*

Los objetivos específicos son los siguientes:

- Identificar y evaluar los indicadores de rendimiento (KPI) utilizados actualmente en la etapa de perforación de la unidad minera de Apurímac.
- Optimizar la etapa de perforación de la unidad minera de Apurímac entre los periodos 2023 – 2024.

- Analizar económicamente el costo ideal, costo real y de la reducción de costos de operación del efecto de la optimización de la etapa de perforación de la unidad minera de Apurímac entre los periodos 2023 – 2024.

1.3. Hipótesis

Se plantea como hipótesis del trabajo que, la aplicación de los indicadores de rendimiento de desempeño (KPIs) va reducir significativamente los costos operativos incurridos en la etapa de perforación como la optimización del proceso de la unidad minera de Apurímac.

1.4. Justificación

La perforación en la industria minera es la primera operación que se realiza, ya que se crean las aberturas necesarias para poder realizar posteriormente la voladura de la roca. Esto requiere de un adecuado manejo a lo largo de la operación para lograr obtener la máxima producción posible con una optimización de costos que aumente la competitividad de la unidad minera en cuestión.

Los indicadores clave de desempeño (KPI) son herramientas útiles que permiten justamente la maximización de la eficiencia productiva a bajos costos. Por lo que la correcta implementación de estos, en base a la información existente, fomentará un buen control y medición de los parámetros operacionales involucrados reduciendo el desperdicio económico y los tiempos muertos. Asimismo, se incrementará la competitividad de la unidad minera frente a otras del mismo rubro, ya que se realizarán las acciones y actividades orientadas al cumplimiento de los objetivos y la misión de la empresa influyendo directamente en la satisfacción de la demanda. De acuerdo a lo expuesto es como se describe las respectivas justificaciones.

En la parte de justificación teoría el presente trabajo de investigación tiene como propósito que los resultados y toda la información obtenida en el presente trabajo pueda servir como un marco orientador a todas las personas involucradas desde directivos, supervisores y operarios de la empresa de la unidad minera de Apurímac para poder incrementar en los conocimientos técnicos sobre la importancia de la elección y aplicación correcta de los indicadores de desempeño KPIs en una etapa de perforación. En cuanto la justificación práctica es la principal porque se ha identificado la necesidad de abordar las problemáticas mencionadas con la aplicación de indicadores de rendimiento teniendo en cuenta la eficiencia que puedan garantizar los resultados económicos adecuado para la rentabilidad del proceso productivo y de tal manera que tengamos una mejora continua, consecuentemente se presenta una justificación metodológica ya que se requiere una serie de actividades desde la recopilación de información para el diagnóstico, aplicación de una metodología para la elección de los indicadores de rendimiento y procesamiento de resultados para una comparación del proceso de mejora.

Se presenta como justificación principal la parte económica, el estudio permitirá evaluar la efectividad de la aplicación de indicadores clave de desempeño en la optimización de los costos operativos de perforación, y que esto tenga un impacto en la rentabilidad de la unidad minera. Finalmente sea presentado la justificación académica, debido a que este trabajo va generar información bibliográfica y se podría emplear como antecedentes para futuras investigaciones relacionados con la aplicación de indicadores de rendimiento y de la optimización en la etapa de perforación de una minería.

1.5. Líneas de Investigación del Trabajo

El presente trabajo tiene como propósito la aplicación de indicadores de rendimiento (KPIs) en la etapa de perforación para la reducción de costos de operación en de la unidad minera de Apurímac, razón por la cual la línea de investigación es: Minería y Medio Ambiente.

1.6. Variables

El presente estudio va presentar variables correlacionales es decir una variable independiente y dependiente; con el propósito de evaluar el efecto de la optimización en el proceso de perforación con indicadores de rendimientos KPI's para la reducción de costos. A continuación, se presenta la identificación de variables en la **Tabla 1**

1.6.1. *Variable Independiente "X"* (Indicadores de Rendimiento KPI's).

a) Definición Conceptual: Un KPI (Indicador Clave de Desempeño) es una métrica que se utiliza para evaluar el rendimiento de un proceso o actividad en relación con objetivos específicos. Conceptualmente, los KPI representan aspectos críticos que se deben monitorear para mejorar la eficiencia, productividad y calidad en diversas áreas, como la gestión operativa, financiera o estratégica. Son indicadores que reflejan el grado de éxito en la consecución de metas y permiten una evaluación objetiva de si los procesos o actividades están alineados con los objetivos estratégicos de una organización.

b) Definición Operacional: Desde un punto de vista operacional, un KPI se define como una métrica cuantitativa que permite medir, de manera continua y estandarizada, el desempeño en áreas clave de la operación. Esto implica seleccionar indicadores específicos que son medibles, relevantes, alcanzables, y comparables.

c) Indicadores: Es la medida que se va utilizar para evaluar la influencia de las variables, los cuales son cuantitativos.

En el presente estudio se empleará los indicadores de rendimiento KPI's como mediciones para cuantificar el efecto de la optimización y se describen a continuación:

- ✓ Disponibilidad Real [%]
- ✓ Uso de disponibilidad [%]
- ✓ Utilización [%]

- ✓ Tasa de Penetración (ROP, siglas en ingles Rate Of Penetration) [m/h]
- ✓ Tiempo de perforación por metro (TPM) [h/m]
- ✓ Durabilidad de la Broca [m/broca] Utilización del Equipo (Horas operativas y no operativas) [%]
- ✓ Eficiencia de perforación [%]

1.6.2. *Variable Independiente “Y”* (Reducción de los costos operativos).

a) Definición Conceptual: Se refiere al proceso de disminuir los gastos asociados a las actividades esenciales de una operación sin comprometer su calidad, eficiencia o seguridad. Esta reducción es fundamental para mejorar la rentabilidad y competitividad de una organización, al permitir una gestión de recursos más eficiente y controlada. La reducción de costos operativos se puede lograr mediante la optimización de procesos, la adopción de tecnología, la minimización de desperdicios, y la mejora de la productividad del personal y los equipos.

b) Definición Operacional: Desde una perspectiva operacional, la reducción de costos operativos implica identificar, medir y ajustar áreas específicas de gasto en el proceso operativo de manera cuantificable

c) Indicadores: Las mediciones que van a evaluar el efecto de los indicadores de rendimiento en la reducción de los costos en el proceso de perforación se describe a continuación:

Los indicadores que van a permitir identificar la reducción de los costos operativos

- ✓ Costo por Metro Perforado [\$/m]
- ✓ Costo de Broca por Metro Perforado [\$/m]
- ✓ Costo por Hora Operativa [\$/h]
- ✓ Relación de Costo-Productividad [%]

Tabla 1.

Operacionalización de las Variables a estudiar

Tipo	Variable	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensión	Indicador	Unidades
Variable independiente	Indicadores de Rendimiento (KPIs)	Conceptualmente, los KPI representan aspectos críticos que se deben monitorear para mejorar la eficiencia, productividad y calidad en diversas áreas, como la gestión operativa, financiera o estratégica.	Desde un punto de vista operacional, un KPI se define como una métrica cuantitativa que permite medir, de manera continua y estandarizada, el desempeño en áreas clave de la operación. Esto implica seleccionar indicadores específicos que son medibles.	Rendimiento de las brocas	Disponibilidad Real	[%]
					Uso de Disponibilidad	[%]
					Utilización	[%]
					Tasa de Penetración (ROP)	[m/h]
					Tiempo de perforación por metro (TPM)	[h/m]
					Durabilidad de la Broca	[m/broca]
					Utilización del Equipo (Hrs OP y NOP)	[%]
Eficiencia de perforación	[%]					

Tipo	Variable	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensión	Indicador	Unidades
Variable dependiente	Reducción de los costos operativos	Se refiere al proceso de disminuir los gastos asociados a las actividades esenciales de una operación sin comprometer su calidad, eficiencia o seguridad. Esta reducción es fundamental para mejorar la rentabilidad y competitividad de una organización, al permitir una gestión de recursos más eficiente y controlada.	Desde una perspectiva operacional, la reducción de costos operativos implica identificar, medir y ajustar áreas específicas de gasto en el proceso operativo de manera cuantificable	Costos	Costo por Metro Perforado	[\$/m]
					Costo de Broca por Metro Perforado	[\$/m]
					Costo por Hora Operativa	[\$/h]
					Relación de Costo-Productividad	[%]
					Relación de Costo-Productividad	[%]



CAPÍTULO II

Fundamentos Teóricos

2.1. Antecedentes de la Investigación

A continuación, se presentan diferentes investigaciones y proyectos de tesis a nivel internacional y nacional obtenidos tras una revisión exhaustiva. De tal forma que sirvan como antecedentes esenciales para el desarrollo de la ejecución de este estudio.

2.1.1 Antecedentes Internacionales

Puma y Llerena (2021), realizaron un estudio enfocado en la optimización del proceso de perforación y voladura en la Sociedad Minera “Los Caprichosos Reina del Rosario” que realiza extracción metálica a pequeña escala en la comunidad La Fortuna - Ecuador. El objetivo del trabajo fue implementar el modelo matemático de Holmberg para el mejoramiento de los aspectos económicos, productivos y operativos en el avance de las galerías. Esto se logró a través de tres fases: la caracterización geomecánica, la aplicación del método de Holmberg y la evaluación y reporte de resultados. Los resultados obtenidos mostraron que la unidad minera presentaba una eficiencia de perforación del 95.33% con una longitud de 1.43 m, mientras que una eficiencia de voladura o avance de frente de 87.41% por debajo del 95% que corresponde a una voladura económicamente adecuada. Posteriormente, se aplicó un diseño de malla de perforación siguiendo el modelo matemático de Holmberg que optimizó el avance de los frentes de perforación en 9.66%, logró una voladura controlada, permitió una fragmentación uniforme y fina, incrementó la velocidad media de perforación y reducción de los tiempos muertos. En conjunto se logró un ahorro anual de \$7529.28 y un avance de frente de 97.03% reduciendo el consumo de insumos y equipos. Este estudio demuestra cómo la implementación de una mejora basada en las condiciones geomecánicas y operativas de una unidad minera conllevan a una optimización de los costos, insumos, equipos y tiempo empleado en la perforación para lograr un crecimiento productivo eficiente.

Vera y Verdezoto (2020), realizaron un estudio técnico económico para la optimización de parámetros de perforación a través del análisis de KPI en los pozos petrolíferos del campo Tambococha – Ecuador. Por lo que se desarrollaron y calcularon los indicadores clave de desempeño asociados a los parámetros de perforación y las características de los pozos para realizar un análisis económico de la reducción de costos tras la implementación. Los KPI se realizaron de acuerdo a 4 líneas de perforación: direccional, brocas, fluidos e ingeniería. Se obtuvo entonces para la línea ingeniería, los KPI: tasa de penetración rotacional promedio real, índice de dificultad direccional, eficacia en la curva de tiempo real versus planificado, tiempos no productivos. Por otro lado, para la línea de herramienta direccional: porcentaje de eficiencia de pies deslizados, porcentaje de eficiencia de tiempo deslizado, configuraciones de arreglos de fondo de pozo ejecutados. En la línea de brocas se tiene los KPI: tasa de penetración rotacional neta real, brocas ejecutadas por sección. Mientras que, en la línea de fluidos, se tienen los KPI: velocidad de viaje en hueco abierto y velocidad de corrida de revestidor en hueco abierto. Tras la aplicación de todos los KPI definidos por los autores se obtuvo una proyección de reducción de costos para la primera sección de 14%, segunda sección de 4% y tercera sección de 0.31%.

Buele (2017), realizó un estudio para la optimización de los parámetros de perforación y voladura en el avance del túnel en la mina Cabo de Hornos - Ecuador. Eso se realizó por medio de ensayos de campo para la identificación geomecánica del macizo rocoso presente en el lugar y el diseño y selección de una malla de voladura que se adecuara a las condiciones del medio. Los resultados obtenidos indicaron que una malla con diseño optimizado, es decir con tres taladros de alivio con ángulo de 45° y un espaciamiento de 7 cm lograron un incremento en la eficiencia del avance de 83% a 95%. Además, se redujo el número de tacos de explosivos en 4 en las cargas de fondo y columna y se obtuvo una mejor perforación específica de 10.38 m/m³. Todo ello conlleva una mejora post-operación, ya que se redujeron los costos y los

tiempos empleados en la operación de perforación y voladura. Este estudio provee información clave para entender la influencia de la aplicación de una adecuada malla de perforación en la obtención de mejoras operativas de producción y ahorro de recursos. Este autor determino una metodología de cálculo para la productividad de perforación de una mina de cielo abierto, donde inicialmente realizo la identificación de las interferencias de la operación de perforación para obtener un diagnostico inicial, el cual se empleó como línea base

2.1.2 Antecedentes Nacionales

Santos (2024), estudió la influencia de los KPIs en la reducción de costos operativos de perforación y voladura en una empresa minera de la región La Libertad. Es por esto que fue fundamental el análisis inicial de la situación de la unidad minera identificando principalmente los costos fijos, costos variables, factores que impidan el avance programado y pérdida de costos operativos en la perforación y voladura. Posteriormente, se procedió a la ejecución de los KPI necesarios para cuantificar eficazmente el desarrollo del trabajo en las operaciones de análisis. Asimismo, se realiza un análisis económico tras la implementación de los KPI para verificar si hay una reducción de costos operativos, mayor control de tiempos muertos y el rendimiento de los equipos.

Los resultados obtenidos muestran que los KPIs implementados de acuerdo al análisis inicial de la unidad minera son: utilización efectiva de equipos, avance de perforación, la confiabilidad de equipos y análisis de pérdida de costos. Por otro lado, se confirma la relación entre la implementación de los KPI y la optimización del 79% en la pérdida de costos en la perforación y voladura logrando no solo una disminución de costos operativos, sino también un aumento de la producción en 63% para los próximos 10 meses de la implementación y mayor control sobre sus actividades. Un proyecto de investigación emplea los indicadores de rendimiento KPIs operativos de la etapa de perforación y también de la voladura al variar los

barrenos de 6' y 8' para la optimización y propuesta de mejora de la Compañía Minera Aurífera Retamas S.A (MARSA). Los resultados encontrados indican los parámetros técnicos con una eficiencia de perforación 92%, tonelaje por disparo 33.85 tn/disp., factor de perforación 7 m/m³, tiempo de perforación 3.4 horas y por la parte económica se tiene un costo de voladura 67 \$/disparo y costo de perforación 311 \$/ml. Como también la implementación de los barrenos indujo a la reducción de las deficiencias de la voladura pasando de un total de 10 hasta 2, dentro de la comparación del uso de barrenos, se concluyo de acuerdo a los indicadores de rendimiento que el barreno de 8 pies presenta una diferencia mejor de 42.3 \$/ml y que representa alrededor de un 11% menos en costos, (Fernandez, 2024).

Rodriguez et al. (2023), ejecutó un estudio de reducción de los costos operativos en la unidad minera Francés de Patáz mediante la optimización de los indicadores clave de desempeño (KPI) de las operaciones unitarias de perforación y voladura. Esto implicó el análisis de los costos operativos actuales, la evaluación de los KPI existentes en la unidad minera, el desarrollo e implementación de nuevos KPI y la evaluación del rendimiento de los costos operativos tras los nuevos parámetros a implementados. Los resultados confirmaron que la aplicación de los nuevos KPI redujo los costos operacionales relacionados a la perforación y a la voladura de 681.07 US\$/m a 615.08 US\$/m. Asimismo, es importante mencionar los logros obtenidos en cada indicador nuevo evaluado. El KPI de número de taladros perforados por hora aumento de 10.93 a 11.43, la tasa de penetración incrementó en 6.08% y el avance por disparo pasó de 1.46 m a 1.55 m. Sin embargo, se identificó factores externos que influyen con la producción, entre estos se tienen: falta de coordinación entre los operarios, inexistencia del plan de mantenimiento preventivo y falta de disponibilidad de los equipos de perforación. Este estudio permite identificar que, aunque se tengan KPI implementados en la unidad minera, es necesario reevaluar si sigue siendo aplicable para las nuevas condiciones de extracción y producción.

Cuellar et al. (2021), realizando sus estudios en la rampa Patrick IV de la Unidad Minera San Andrés en la empresa Minera Marsa S.A, mediante la aplicación de indicadores de rendimiento buscan afrontar la problemática de la sobrerotura y de la sobreperforación. De esta forma, realizan el empleo de sismógrafos para la evaluación de los procesos de voladura, logrando resultados de optimización de los KPI's de las etapas de voladura y perforación reduciendo el factor de carga de 25 a 23 kg/m y la reducción del factor de potencia hasta 1.05 kg/m³ donde inicialmente era de 1.29 kg/m³. No obstante, dicho efecto no se vio reflejado en la reducción de la sobrerotura de lo programado, por lo contrario, presentó un exceso de 9.41%.

2.2. Bases Teóricas del Proyecto

La minería es una actividad económica extractiva importante en el Perú ocupando el segundo puesto a nivel mundial en producción de plata, cobre y zinc y el primer puesto en producción de oro, estaño, plomo, zinc y molibdeno en América Latina (MINEM). La extracción de los minerales para su posterior comercialización debe cumplir con una serie de operaciones unitarias continuas en la unidad minera como se muestra en la **Figura 1**.

Figura 1.

Secuencia de las operaciones unitarias en minería.

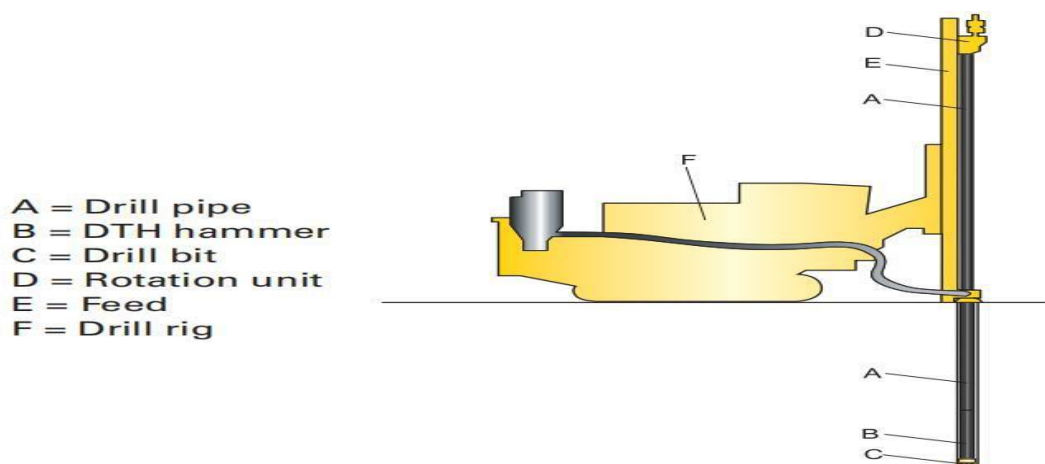


Este estudio se enfoca en el mejoramiento de la operación de perforación por lo que se hará especial énfasis en este. El proceso de extracción comienza con la perforación que consiste en realizar orificios cilíndricos en el macizo rocoso con una distribución y geometría específicos para la posterior carga de los accesorios de voladura y explosivos, logrando así su fragmentación según los principios mecánicos de rotación y percusión.

La perforación rotopercutiva es la que se aplica en la industria minera. Es un conjunto de acciones para la generación de orificios, siendo estas la percusión (golpeo del pistón a la varilla), rotación (giro de la broca en contacto con la roca), empuje (contacto permanente con el macizo rocoso) y barrido (extracción de residuos tras la perforación con un fluido). Los tipos de perforadoras que realizan esta operación pueden ser: neumáticas (aplicación de aire comprimido para accionar el martillo), hidráulicas (sistema de bombas para el suministro de aceite que accione el martillo) o manuales (accionadas con agua como fluido de barrido que pueden ser empuñadas con una sola mano). Por otro lado, los tipos de perforación rotopercutiva dependen de la ubicación del martillo: martillo en fondo (rotación fuera del barreno y percusión directa en la broca) y martillo en cabeza (rotación y percusión fuera del barreno que se transmite por una varilla hacia la broca), a continuación se muestra graficamente en la **figura 2**.

Figura 2.

Acciones de la perforación rotopercutiva (DTH).



Este estudio pretende optimizar la operación de perforación por medio de indicadores claves de desempeño (KPI). Los KPI son herramientas que ayudan a valorar cuantitativamente el rendimiento de un proceso asignando un indicador que permita realizar mediciones a largo plazo. Su importancia se deriva de su aplicación, ya que permiten desarrollar una estrategia para lograr un objetivo empresarial, entre los que se podrían encontrar un incremento en la productividad, reducción de costos operacionales, disminución de tiempos muertos y maximización de eficiencia de recursos.

Es importante resaltar que los KPI son únicos dependiendo de las características del proceso, la empresa, los objetivos y las operaciones abarcadas; por lo que no existe una fórmula general para cada situación.

Las características que deben cumplir los indicadores son esencialmente las siguientes:

- **Medible:** Deben poder ser medidos en unidades.
- **Cuantificable:** Existen métodos que pueden ser utilizados para medir el indicador.
- **Específicos:** Es concreto.
- **Temporal:** Presenta continuidad en el tiempo.
- **Relevante:** Aporta información para la toma de decisiones.

Por otro lado, un KPI no podría ser adecuadamente implementado sin un sistema de indicadores que la evaluación del desempeño del indicador a lo largo del tiempo. Sus componentes son:

- **Nivel Base:** Estado previo a la implementación del indicador a medir.
- **Valor Actual:** Estado del indicador durante el periodo de medición y ejecución de las iniciativas de mejora.
- **Meta:** Estado objetivo del indicador tras la aplicación de las acciones de mejora.

- **Semáforos:** Escala de colores que permiten visualizar el desempeño del indicador donde el color verde es un desarrollo adecuado, amarillo un desempeño aceptable y rojo un desempeño inaceptable.

2.3. Marco Conceptual

a) Burden: es la distancia entre el eje del taladro y la cara libre más próxima, siendo el parámetro de mayor importancia en el proceso de voladura. Cuando el burden se reduce, se genera una mayor liberación de energía, lo que incrementa la proyección de las rocas y las vibraciones generadas. Su unidad de medida es el metro (m). (Oviedo, 2017).

b) Eficiencia: la capacidad de optimizar el uso de recursos (como energía, equipo, tiempo y mano de obra) para maximizar la extracción de mineral con el menor impacto ambiental, costo y riesgo posible. La eficiencia en este contexto implica lograr un equilibrio entre productividad y sostenibilidad, buscando minimizar los desperdicios y reducir los costos operativos mientras se maximiza la rentabilidad del proceso. Para medir la eficiencia en minería, se utilizan diversos indicadores de desempeño (KPI) que evalúan aspectos clave del proceso minero, como el rendimiento de la maquinaria, la velocidad de extracción y procesamiento, la tasa de recuperación de mineral, el consumo energético y el impacto ambiental.

c) Espaciamento: Es la separación que existe entre taladros, tomando en cuenta el radio de fracturación de la roca.

d) KPI: En minería, los KPI (Indicadores Clave de Desempeño) son métricas utilizadas para evaluar la eficiencia, productividad y efectividad de diferentes procesos operativos dentro de una operación minera. Estos indicadores ayudan a monitorear y mejorar el rendimiento en áreas como la extracción de mineral, procesamiento, seguridad, mantenimiento de equipos, costos y sostenibilidad.

e) Paralelismo: En la perforación de rocas, el término paralelismo se refiere a la alineación de las direcciones de perforación entre un grupo de taladros dentro de una misma estructura o sección.

f) Perforación: La perforación es el proceso de hacer agujeros o barrenos en una superficie, como roca, suelo o estructuras, mediante el uso de herramientas y equipos especializados.

g) Perforación Óptima: La perforación óptima busca reducir al mínimo problemas como la sobrerotura, la subperforación y la fracturación innecesaria, además de optimizar el consumo de energía y recursos (por ejemplo, brocas y explosivos).

h) Taladros de Precorte: Son perforaciones diseñadas para definir el contorno de la excavación y minimizar la sobre-excavación. Su propósito principal es generar una fractura controlada en la roca, permitiendo su desprendimiento con mínima vibración y mejorando la estabilidad de los taludes.

i) Taladros de Buffer: Están ubicados en la parte media o interior del frente de voladura. Su función es fragmentar el material dentro del bloque a volar, facilitando su remoción posterior y mejorando la eficiencia en el proceso de excavación.

j) Taladros de Cresta: Se encuentran en el borde o la parte superior de un banco de voladura. Estos taladros son clave para controlar la estabilidad del talud, evitando desprendimientos no controlados y optimizando la distribución de la energía explosiva.

k) Taladros de Ayuda: Son perforaciones adicionales que se realizan cuando es necesario mejorar la fragmentación o corregir desviaciones en la voladura. Se utilizan en zonas de mayor dureza o cuando se requiere optimizar la eficiencia de la voladura para obtener una fragmentación más uniforme del material.



CAPÍTULO III

Marco Metodológico

3.1. Alcances y Limitaciones

3.1.1. Alcances

El presente trabajo de investigación va aplicar indicadores claves de rendimientos (KPIs) para determinar, analizar y evaluar el diámetro de broca utilizada en la perforación para la reducción de los costos operativos de la unidad minera de Apurímac. El ámbito del presente estudio se llevará a cabo en la unidad minera de Apurímac, y se centrará concretamente en la etapa de perforación y haciendo la exclusión de los otros procesos como voladura, transporte entre otros que se encuentra relacionado indirectamente, el análisis de la investigación cubrirá los periodos de los años 2022-2023-2024 durante este tiempo se recopilaran y analizaran los datos obtenidos con el uso de diferentes diámetros de broca. Para ello, se evaluarán los indicadores de rendimiento, como es el caso de la tasa de perforación (ROP), la eficiencia del uso de los taladros, la determinación del tiempo no productivo (NPT), y crucialmente el costo por metro perforado y de los costos de mantenimiento, esto permitirá evaluar el impacto de la variación del diámetro de la broca. Se realizará la recopilación de los datos mediante los registros operativos internos dentro de la unidad minera y para el procesamiento de los resultados obtenido se empleará software especializado de análisis estadísticos con el propósito de evaluar el efecto de los indicadores con el costo de operación.

El proyecto no tomara en cuenta aspectos de la operación minera fuera de la etapa de perforación y en la estimación económica no considerara los factores externos como las fluctuaciones en los precios de equipo, mano de obra o cambios en la demanda del mercado que puedan influir en la rentabilidad de las operaciones. Así como también, no se abordará el estudio del impacto ambiental del proceso de perforación. Así mismo, el presente estudio

también evaluará el efecto del cambio de diámetro de broca en la etapa de perforación de la unidad minera de Apurímac, considerando dos escenarios operativos:

- a) perforación con broca de 6 1/8'' (enero 2022 – abril 2023, gestión MMG).
- b) perforación con broca de 5'' (mayo 2023 – 2024, gestión OWM).

La comparación entre ambos diámetros se realizará mediante indicadores clave de desempeño (KPIs), con el fin de determinar su influencia en la productividad, el desgaste de brocas y la reducción de costos operativos.

3.1.2. Limitaciones

Debido a que el presente proyecto de investigación se realizará bajo condiciones reales de operación en la unidad minera no se podrá tener el control de todas las variables, sin embargo, se realizará la delimitación de ciertos parámetros para evitar la influencia en los resultados, en este caso no puede controlar las características geológicas de la roca a ser perforada, por lo que no se tomara en cuenta dicha variable como también se despreciara la variabilidad en la experiencia personal, debido a que diferentes operadores pueden tener niveles de eficiencia en función a la experiencia que se cuenta en estas actividades por lo que podría influir en los resultados, esta variabilidad no será controlada en este estudio. Como también se realizará el procedimiento de filtración de los registros de los datos históricos operativos proporcionados por la unidad minera bajo condiciones imprevistas, es decir cuando se presentan fallas mecánicas importantes en los equipos de perforación o en cambios de los planes de producción que podrían alterar las condiciones bajo las cuales se realiza el análisis.

Cabe resaltar que no se evaluarán los criterios de contratación o gestión del cambio de proveedor (MMG – OWM), ya que el alcance se limita únicamente al análisis técnico–operativo del desempeño de ambos diámetros de broca.

3.2. Aporte

El presente trabajo de tesis va a permitir un aporte significativo en el campo de la minería, inicialmente los resultados obtenidos en el presente trabajo les van a ofrecer a la unidad minera sacar conclusiones críticas en su proceso de operación, tomar decisiones y medidas en la etapa de perforación para la optimización de su proceso mediante el análisis de la variación de diámetro de la broca permitirá identificar el tamaño óptimo que maximice la tasa de penetración (ROP), minimice el desgaste del equipo y reduzca los tiempos no productivos (NPT). Esta optimización no solo impactará en la productividad, sino que también reducirá los costos operativos asociados a la perforación, lo que beneficiará directamente a la operación minera.

Por otro lado, este trabajo de investigación proporcionará una metodología basada en KPIs que pueden ser replicados en otras unidades mineras o sectores industriales similares. Los KPIs seleccionados, como el costo por metro perforado, la vida útil de las brocas y el tiempo no productivo, permiten medir de manera objetiva la eficiencia y los costos operativos, facilitando la toma de decisiones basadas en datos para la mejora continua del proceso.

No solo tendrán un impacto económico, sino también ambiental, por lo que existe un aporte de sostenibilidad, ya que la optimización del uso de brocas y otros recursos contribuirá a una operación minera más sostenible, al reducir el desperdicio de insumos y disminuir la huella de carbono asociada a la operación. Como también, este trabajo tendrá un aporte académico, no existe alguna referencia bibliográfica que haya estudiado el efecto del diámetro de la broca con la aplicación de KPIs, por lo que este estudio pretende ser un punto de referencia para futuros estudios en el sector minero del país, esto aportará conocimiento y herramientas para mejorar la competitividad y eficiencia en diversos contextos productivos. Se espera que los resultados de este trabajo de investigación aporten información valiosa sobre la relación entre el diámetro de la broca y los costos de operación, brindando a la unidad minera de

Apurímac estrategias concretas para mejorar su eficiencia operativa y reducir sus costos en la etapa de perforación.

3.3. Tipo y Nivel de la Investigación

3.3.1. Tipo de Investigación

El tipo de investigación que se va realizar en este estudio es del tipo de aplicada, concretamente porque los ensayos experimentales se realizan en condiciones reales de unidad minera, este tipo de investigación se enfoca en resolver problemas prácticos en un campo específico, para este caso el trabajo de estudio pretende mejorar el proceso de perforación en la unidad minera para la reducción de los costos operativos. Esto implica las aplicaciones de conocimiento tanto teóricos como prácticos para mejorar la eficiencia y rentabilidad del proceso de perforación.

Así mismo este estudio va ser efectuado a nivel cuantitativo para evidenciar la causa y efecto del diámetro de perforación para saber las ventajas técnicas y económicas en el proceso de perforación, ya que se realizará los diferentes análisis mediante indicadores de rendimiento KPI's.

Por otro lado, el presente estudio es del tipo de investigación-transversal, debido que los datos recolectados en la práctica de perforación van a corresponder a un momento definido, en ese punto del tiempo se realizara el análisis de datos sobre los indicadores clave de desempeño, (Babbie, 2013).

3.3.2. Nivel de Investigación

El proyecto de investigación constituye las características metodológicas de un nivel del tipo descriptivo, este tipo se caracteriza por describir la situación actual del proceso de perforación con el diámetro de perforación actual, seguido de la descripción de la situación

final de la operación de perforación en la unidad minera con el diámetro optimizado mediante la evaluación de la cantidad de recursos empleado y costos operativos.

Así también según Según Espinoza, L. y Ochoa, J. (2020), la investigación es del nivel de investigación correlacional, ya que se pretende evaluar el grado de la relación y nivel de significancia existente entre los indicadores de rendimiento KPI's de perforación frente a la efectividad y eficiencia del diámetro de la broca.

3.4. Población y Muestra

3.4.1. Población

El trabajo de investigación es intencional no probabilístico, por lo que la población está conformada por todo lo contenido de la una unidad minera de cobre localizada en la región de Apurímac, dentro de la cual las instalaciones abarcan una extensión de área 500 ha, pero específicamente el área de perforación con una extensión aproximada según el proyecto que corresponda.

3.4.2. Muestra

El tamaño de la muestra va a ser delimitada, se tomará de forma intencionada para el caso del proyecto de investigación, por lo tanto, la muestra estará conformado por el área de perforación y voladura, la ubicación exacta es representada por las coordenadas de 14°5'56.48" S, 72°19'11.21" W.

3.4.3. Muestreo

El muestreo en esta investigación se llevó a cabo mediante la técnica de muestreo no probabilístico, específicamente a través de muestreo por conveniencia, utilizando la muestra

que resultaba más adecuada para el estudio. Este enfoque permite seleccionar los elementos más convenientes para los objetivos de la investigación. (Niño, 2011).

3.5. Metodología Experimental

El trabajo de investigación constará en la recopilación de datos del periodo 2022 como línea base, después se toma en cuenta los datos recopilados del periodo 2023 hasta el 2024, el cual se dividirá en tres etapas: en la primera etapa constará de una programación del trabajo en campo de la etapa de perforación y de la recopilación de datos mediante una serie de registros, como segunda etapa será la prueba en campo de la variación del diámetro de broca y finalmente la tercera etapa consistirá en la etapa posterior al trabajo de campo, la cual consiste en el proceso de optimización de la etapa perforación.

3.5.1. Procedimiento Experimental de la Investigación

El procedimiento de recolección se empieza con el primer turno, por partes de los procedimientos y estándares de la unidad minera todo el personal humano debe recibir la capacitación de seguridad y salud ocupación, seguidamente del cumplimiento del programa asignado para las actividades de voladura y perforación, todo esto está acompañado de la documentación que son: Check list de equipos, los registros de los IPERC y la ficha de registro de perforación.

En el presente estudio, se pone mayor énfasis en la ficha de registro de perforación ya que esta información recopilada servirá en el procesamiento de datos, donde es imperativo el correcto llenado del registro de perforación para de esta manera llevar un control y estadística, el llenado consiste en el registro de los apartados que son: datos del equipo de perforación (código interno), descripción detallada de los datos del operador y personal a cargo (nombre de perforista y ayudante de perforista), descripción de los detalles del proyecto (proyecto y

labor), número de taladros, características del taladro (longitud, desviación y diámetro), consumo de accesorios (brocas y barrenos), el avance lineal (metros por avance) y descripción de las condiciones operativas. Los datos se medirán empleando diferentes escalas de medición, que van desde nominal hasta datos en ratio, todo esto según la naturaleza de cada variable. Finalmente, los operadores deben realizar la entrega de la documentación, para que dicha información sea digitalizada hacia una base de datos en Excel.

Para la obtención de los indicadores de desempeño KPI's, se realizará al final de cada turno de trabajo por parte de la zona de operaciones de mina a través de los datos registrados en campo, como también de los datos brindados por los reportes de perforación recopilados en la base de datos de Excel.

3.5.2. *Materiales*

- ✓ Bases de Datos
- ✓ Hojas de Calculo

3.5.3. *Indicadores de Rendimiento KPI's*

- ✓ Disponibilidad Real [%]: Mide el porcentaje de tiempo en el que el equipo de perforación está disponible para operar, considerando los tiempos de mantenimiento y fallas mecánicas.

$$DR [\%] = \left(\frac{\text{Tiempo Total} - \text{Tiempo de Mantenimiento}}{\text{Tiempo Total}} \right) \times 100$$

- ✓ Uso de Disponibilidad [%]: Indica el porcentaje de tiempo disponible que realmente se utiliza para perforar, excluyendo tiempos muertos por inactividad operativa.

$$\text{Uso de Disponibilidad} [\%] = \left(\frac{\text{Tiempo Operativo Efectivo}}{\text{Tiempo Disponible}} \right) \times 100$$

- ✓ Utilización [%]: Mide qué porcentaje del tiempo total disponible se usa realmente para perforación, incluyendo tanto la disponibilidad del equipo como su uso efectivo.

$$\text{Utilización [\%]} = \left(\frac{\text{Tiempo Operativo Efectivo}}{\text{Tiempo Total}} \right) \times 100$$

- ✓ Tasa de Penetración (ROP, Rate of Penetration) [m/h]: Indica la velocidad con la que la broca avanza en la perforación, expresada en metros por hora. Es un indicador clave del rendimiento del equipo.

$$\text{ROP [m/h]} = \left(\frac{\text{Metros Perforados}}{\text{Tiempo de Perforación (h)}} \right)$$

- ✓ Tiempo de Perforación por Metro (TPM) [h/m]: Mide el tiempo requerido para perforar un metro lineal, inverso de la tasa de penetración (ROP).

$$\text{TPM [h/m]} = \left(\frac{\text{Tiempo de Perforación (h)}}{\text{Metros Perforados}} \right)$$

- ✓ Durabilidad de la Broca [m/broca]: Indica cuántos metros perfora una broca antes de necesitar reemplazo, lo que permite evaluar su rendimiento y costo operativo.

$$\text{Durabilidad [m/broca]} = \left(\frac{\text{Metros Perforados}}{\text{Números de Brocas Usadas}} \right)$$

- ✓ Utilización del Equipo [%]: Mide el porcentaje del tiempo total del equipo que se utiliza para operar, incluyendo perforación y otras actividades auxiliares (desplazamiento, preparación).

- ✓ Eficiencia de Perforación [%]: Mide el aprovechamiento real del tiempo de perforación con relación al tiempo disponible. Evalúa la combinación de la utilización y la tasa de penetración.

$$\text{Eficiencia de Perforación}[\%] = \left(\frac{\text{Metros Perforados}}{\text{Tiempo Disponible} \times \text{ROP Ideal}} \right) \times 100$$

3.6. Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos

Para desarrollar indicadores clave de rendimiento (KPI) en la etapa de perforación de una unidad minera, es crucial implementar técnicas e instrumentos de recolección de datos precisos, ya que estos permiten monitorear el desempeño operativo, detectar oportunidades de mejora y optimizar los costos de operación. Las técnicas e instrumentos más adecuados para el trabajo de investigación incluyen:

- ❖ **Observación Directa:**

Descripción: Esta técnica implicará el seguimiento de las operaciones de perforación del periodo establecido, a través de esta técnica, es posible identificar ineficiencias, posibles riesgos operativos, pero sobre todo documentar variables relevantes como tiempo de perforación y uso de equipos.

Instrumento: Se empleará hoja de registro de actividades y bitácoras de campo.

- ❖ **Recolección de Datos**

Descripción: La técnica que se desarrollará en el presente estudio, es la técnica de recolección de datos cuantitativos, es decir una técnica que va permitir recolectar datos numéricos de pueden ser medidos y analizados estadísticamente, dentro de las diferentes técnicas se realizará la aplicación mixta de la técnica de la observación directa y de registro y

base de datos de fuentes no estructuradas, específicamente esta última va consistir en la recolección de datos a través de fuentes ya existentes, es decir se dispone de la información previamente recopilada y no de generar nuevos datos mediante experimentación. La técnica se va caracterizar al ser longitudinal para poder comparar como han cambiado ciertas variables a lo largo de un periodo de tiempo.

Instrumento: Hoja de registro.

❖ **Recolección de Datos en Campo**

Descripción: Se implementará un sistema de monitoreo para capturar los datos operacionales en tiempo real. Esto puede incluir sensores en los equipos de perforación, registros manuales de operarios y reportes de producción. Entre los datos a recolectar están: Horas operativas y tiempo de inactividad, Metros perforados por turno y por día. Consumo de insumos y costos asociados, entre otros.

Instrumento: Hoja de registro de operación del turno, registro de consumo de insumos, reporte de mantenimiento.

❖ **Registro de Datos Históricos**

Descripción: Comprenderá de la revisión y análisis de los registros históricos para identificar patrones en el desempeño de las perforaciones anteriormente y calcular métricas de rendimiento en función del historial de operación. Se administrará la mayor información posible como frecuencia de cambios de brocas, consumo de energía y otros datos clave.

Instrumentos: Base de datos de operación de perforación, informes anteriores y registros de mantenimiento de equipos.

❖ **Análisis de Reporte de Rendimiento:**

Descripción: Se analizará los reportes de rendimiento generados regularmente por el equipo técnico de trabajo, esta información ofrecerá información estructurada sobre el progreso de las actividades de perforación. El análisis de esta información permitirá calcular las métricas como, el avance de perforación diario, la vida útil de las brocas y la tasa de perforación por hora.

Instrumentos: Reportes de rendimiento, software de análisis de datos y los dashboards de KPI's.

❖ **Control de Costos y Consumos**

Descripción: La técnica de recopilación de datos sobre costos operativos y consumos de insumo como, por ejemplo, energía, agua y consumibles es crucial para el desarrollo de KPI's de eficiencia de costos. Esta información permitirá calcular el costo por metro perforado y otros indicadores de eficiencia económica.

Instrumentos: Hojas de cálculos financieros, registro de inventarios de insumos y consumibles, Software de gestión de costos.

3.7. Técnicas de Análisis

Previamente al procesamiento de datos existe el requerimiento del proceso de filtración y selección de la base de datos de información atípica o mediante las observaciones declaradas en el registro de datos, por esta razón se empleará la aplicación de un software Microsoft Excel 2020. Consiguientemente en el procesamiento de datos se aplicará el análisis estadístico, el software permitirá obtener el análisis de los datos para la obtención de gráficas y tablas como resultados.

3.8. Procesamiento de Datos

El procesamiento de resultados constara en realizar un análisis en cuanto a la situación actual de las operaciones de la etapa de perforación mediante el procesamiento de los diferentes reportes obtenidos, registros de los estándares operaciones y los respectivos costos unitarios, que conllevara a la obtención de los Indicadores de Desempeño KPI's.

Los resultados obtenidos mediante la toma de los datos que van ser registrados en las tablas de recopilación de datos, se registrarán en una hoja de cálculo de Microsoft Excel para realizar el procesamiento de los datos. Realizado el análisis de datos, se representará los resultados mediante tablas, figuras y graficas para su posterior interpretación.

3.8.1. *Procesamiento Estadístico*

Finalmente, para el contraste de la hipótesis, se utilizará el software Microsoft Excel, la elección de las pruebas estadísticas está sujeta a las características del estudio como se presenta en el estudio. Para la investigación se empleará la prueba t para muestras relacionadas (pareadas), esta prueba estadística permite evaluar si existe una diferencia significativa entre las medias de dos mediciones de la misma muestra en su estado inicial y después. Si no se cumple el supuesto de normalidad en los datos, una prueba no paramétrica como la prueba de rangos con signo de Wilcoxon puede ser una alternativa, ya que no requiere la normalidad en la distribución de los datos y es adecuada para muestras pareadas de tamaño grande o pequeño.



CAPÍTULO IV

Resultados

4.1. Identificación y Evaluación de los Indicadores de Rendimiento (Kpis) Utilizados Actualmente en la Etapa de Perforación de la Unidad Minera de Apurímac

Con la finalidad de cumplir el primer objetivo específico, se realizó la identificación y evaluación de los indicadores de rendimiento empleados en la etapa de perforación de la unidad minera de Apurímac, a partir del análisis de los registros operativos, productivos y valorizables correspondientes al periodo enero de 2022 a diciembre de 2023. La evaluación se enfocó en los KPIs que actualmente permiten monitorear el desempeño de la operación, entre ellos: velocidad de perforación, metros perforados, disponibilidad real, utilización real, uso de disponibilidad, eficiencia operativa, cumplimiento de planes mensuales y valorización de la producción ejecutada.

En términos generales, la información analizada evidenció que la gestión de perforación se viene controlando mediante indicadores operativos de productividad y desempeño mecánico, así como mediante indicadores de cumplimiento de metas y valorización económica. Ello permitió no solo identificar cuáles son los KPIs actualmente empleados, sino también reconocer su comportamiento mensual y su utilidad para la toma de decisiones técnicas y operativas.

4.1.1. Identificación de los Kpis Utilizados en la Etapa de Perforación

A partir de la revisión de la base de datos operativa, se identificó que los principales indicadores de rendimiento empleados en la unidad minera fueron los siguientes:

- velocidad de perforación o rate of penetration (ROP), expresada en m/h;
- metros perforados por mes;
- disponibilidad real del equipo;

- utilización real del equipo;
- uso de disponibilidad;
- eficiencia operativa de perforación;
- horas operativas e inoperativas;
- metros valorizables;
- cumplimiento respecto al budget, contrato y plan mensual;
- déficit o superávit mensual de producción.

Estos indicadores permitieron evaluar el comportamiento del proceso de perforación desde dos perspectivas complementarias. La primera estuvo orientada al desempeño técnico-operativo de los equipos; la segunda, al grado de cumplimiento de los compromisos de producción y a su efecto económico en la valorización mensual del servicio.

4.1.2. *Evaluación Histórica de los Indicadores Operativos Base (Enero 2022 – Abril 2023)*

El análisis histórico de los indicadores base mostró que, durante el periodo enero 2022 – abril 2023, la operación alcanzó una velocidad promedio de perforación de 25.69 m/h, con un total acumulado de 480,417.40 m perforados, una disponibilidad real promedio de 88.49%, una utilización real promedio de 51.11% y una eficiencia promedio de 59.23%.

Estos resultados permiten advertir que, aunque la disponibilidad mecánica fue relativamente alta, la utilización y la eficiencia no mantuvieron el mismo nivel de desempeño. En otras palabras, los equipos estuvieron disponibles gran parte del tiempo, pero no necesariamente fueron aprovechados de forma sostenida en la operación efectiva. Este comportamiento es importante porque revela que el problema no se concentró únicamente en la condición mecánica de los equipos, sino también en la manera en que dicha disponibilidad se tradujo en producción real.

En cuanto a la variación mensual, se observó que los mejores resultados de eficiencia se registraron en setiembre de 2022 (99.60%), julio de 2022 (96.82%) y abril de 2023 (96.53%), coincidiendo con periodos de alta utilización real, superiores al 78%. Por el contrario, los valores más bajos de eficiencia ocurrieron en mayo de 2022 (9.59%), febrero de 2023 (16.90%) y abril de 2022 (26.47%), meses en los cuales también se reportaron niveles reducidos de utilización real, de 9.5%, 16.53% y 25.2%, respectivamente.

Tabla 2.

Indicadores operativos base (enero 2022 - abril 2023).

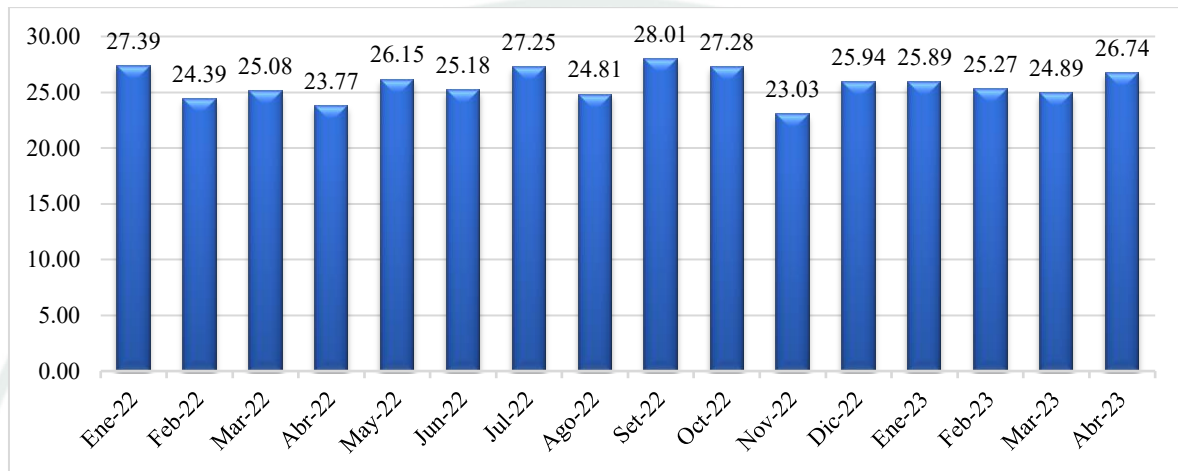
Fecha	Vel. Perf.	Metros Perf.	% Disp. real	% Útil real	Eficiencia
Ene-22	27.39	20,221.00	87.1%	45.4%	52.08%
Feb-22	24.39	12,162.00	94.9%	28.6%	30.16%
Mar-22	25.08	25,031.00	89.1%	55.6%	62.40%
Abr-22	23.77	11,367.00	95.0%	25.2%	26.47%
May-22	26.15	4,896.00	99.3%	9.5%	9.59%
Jun-22	25.18	29,871.50	92.0%	61.8%	67.23%
Jul-22	27.25	54,356.00	81.42%	78.84%	96.82%
Ago-22	24.81	46,328.50	82.83%	72.87%	87.97%
Set-22	28.01	52,838.00	83.52%	83.18%	99.60%
Oct-22	27.28	53,361.30	87.96%	78.40%	89.13%
Nov-22	23.03	17,934.60	80.98%	34.31%	42.37%
Dic-22	25.94	30,896.00	83.32%	49.98%	59.99%
Ene-23	25.89	21,015.00	90.57%	33.87%	37.40%
Feb-23	25.27	9,649.00	97.81%	16.53%	16.90%
Mar-23	24.89	39,656.00	86.99%	63.60%	73.11%
Abr-23	26.74	50,834.50	82.91%	80.03%	96.53%
TOTAL	25.69	480,417.40	88.49%	51.11%	59.23%

Este comportamiento confirma que la eficiencia operativa se encuentra fuertemente influenciada por la utilización efectiva del equipo. De hecho, aun cuando en algunos meses la disponibilidad real superó el 90%, la baja utilización redujo significativamente el rendimiento global del proceso. Tal situación se aprecia, por ejemplo, en mayo de 2022, donde se tuvo una disponibilidad real de 99.3%, pero una utilización de solo 9.5%, lo que condujo a una eficiencia

de apenas 9.59%. En términos operativos, ello sugiere que el equipo estuvo apto para operar, pero permaneció gran parte del tiempo sin generar producción efectiva.

Figura 3.

Velocidad de perforación promedio.



4.1.3. Comportamiento de la Productividad Mensual y Metros Perforados

Respecto a la productividad física, los metros perforados presentaron una marcada variabilidad entre meses. Los valores más altos se reportaron en julio de 2022 (54,356.00 m), octubre de 2022 (53,361.30 m) y setiembre de 2022 (52,838.00 m), mientras que los más bajos se registraron en mayo de 2022 (4,896.00 m) y febrero de 2023 (9,649.00 m).

La producción mensual mostró, por tanto, una relación directa con la utilización y la eficiencia. Los meses con mayor cantidad de metros perforados coincidieron con mejores condiciones operativas, mientras que los meses de menor producción estuvieron asociados a reducciones significativas en el uso efectivo de los equipos. Esto permite interpretar que el KPI de metros perforados, si bien representa el resultado final del proceso, depende en gran medida del comportamiento previo de la disponibilidad, la utilización y la velocidad de perforación.

Desde una perspectiva económica, los 480,417.40 m valorizables acumulados generaron una valorización total de US\$ 5,390,283.23, de los cuales US\$ 4,030,929.74

correspondieron al año 2022 y US\$ 1,359,353.49 al primer tramo del año 2023 considerado en la base histórica. Esto demuestra que el seguimiento de la producción perforada no solo constituye un indicador técnico, sino también un componente directamente vinculado al ingreso valorizado del proceso.

Tabla 3.

Metros ejecutados-varolizable.

Mes / equipo	TD11	TD12	TD30	TD31	total, mes (m)	valorización (\$)
Ene-22	4,977.00	4,619.00	0.00	10,625.00	20,221.00	\$226,879.62
Feb-22	4,099.00	3,230.00	0.00	4,833.00	12,162.00	\$136,457.64
Mar-22	6,909.00	8,730.00	0.00	9,392.00	25,031.00	\$280,847.82
Abr-22	3,654.00	3,522.00	0.00	4,191.00	11,367.00	\$127,537.74
May-22	1,189.00	0.00	0.00	3,707.00	4,896.00	\$54,933.12
Jun-22	8,485.50	9,229.00	1,351.00	10,806.00	29,871.50	\$335,158.23
Jul-22	14,631.00	13,490.00	10,865.00	15,370.00	54,356.00	\$609,874.32
Ago-22	12,883.00	12,418.50	9,406.00	11,621.00	46,328.50	\$519,805.77
Set-22	12,674.00	12,415.00	12,482.50	15,266.50	52,838.00	\$592,842.36
Oct-22	14,043.00	12,213.00	12,962.00	14,143.30	53,361.30	\$598,713.79
Nov-22	2,045.00	3,722.00	4,658.00	7,509.60	17,934.60	\$201,226.21
Dic-22	7,190.00	8,807.00	5,623.00	9,276.00	30,896.00	\$346,653.12
Ene-23	5,221.00	2,289.00	5,958.00	7,547.00	21,015.00	\$235,788.30
Feb-23	0.00	4,126.00	5,291.00	232.00	9,649.00	\$108,261.78
Mar-23	9,194.50	9,457.00	9,678.50	11,326.00	39,656.00	\$444,940.32
Abr-23	12,062.00	12,590.00	13,538.50	12,644.00	50,834.50	\$570,363.09
TOTAL	119,257.00	120,857.50	91,813.50	148,489.40	480,417.40	\$5,390,283.23

4.1.4. Evaluación de la Velocidad de Perforación por Equipo

En cuanto a la velocidad de perforación, se observó que los equipos TD11, TD12, TD30 y TD31 presentaron un comportamiento relativamente estable, con valores que en la mayoría de los meses oscilaron entre 24 y 28 m/h. Entre los registros más elevados destacaron el TD12 en enero de 2022 con 31.41 m/h, el TD31 en setiembre de 2022 con 30.22 m/h, y varios equipos que superaron los 28 m/h durante los meses de mayor producción.

La estabilidad de este indicador sugiere que el proceso de perforación mantuvo una capacidad técnica aceptable en términos de avance por hora; sin embargo, el problema principal no estuvo tanto en la velocidad instantánea de perforación, sino en la continuidad operacional del proceso. Es decir, la velocidad de perforación por sí sola no explicó las caídas en producción, sino más bien la reducción de horas efectivamente aprovechadas para perforar y las pérdidas asociadas a tiempos no productivos.

Tabla 4.

Velocidad de perforación.

Mes / equipo	TD11	TD12	TD30	TD31
Ene-22	24.33	31.41	0.00	26.77
Feb-22	24.80	21.39	0.00	27.49
Mar-22	23.43	25.28	0.00	26.26
Abr-22	22.96	24.43	0.00	23.98
May-22	28.43	0.00	0.00	25.23
Jun-22	25.04	24.94	19.83	26.53
Jul-22	27.18	25.84	28.27	27.91
Ago-22	27.18	25.84	28.27	27.91
Set-22	28.52	25.55	27.78	30.22
Oct-22	26.81	27.35	25.76	29.17
Nov-22	21.11	20.09	24.13	24.67
Dic-22	25.32	26.67	23.93	27.44
Ene-23	23.91	29.28	26.47	25.37
Feb-23	0.00	24.99	27.89	20.07
Mar-23	24.54	24.87	24.51	25.50
Abr-23	25.89	28.35	26.27	26.56

4.1.5. Evaluación de Horas Operativas e Incidencia en el Desempeño

El análisis de horas operativas e inoperativas reforzó esta interpretación. Durante los meses de mayor producción, como julio, setiembre y octubre de 2022, se registraron también mayores horas operativas, con valores de 1,995.33 h, 1,884.87 h y 1,958.50 h, respectivamente. En contraste, durante mayo de 2022, las horas operativas fueron de apenas 188.72 h, lo cual explica el bajo volumen perforado de ese mes.

Tabla 5.*Horas operativas.*

mes / equipo	TD11 (hrs/mes)	TD12 (hrs/mes)	TD30 (hrs/mes)	TD31 (hrs/mes)	Hrs op Totales	Hrs inop
Ene-22	204.54	147.03	0.00	396.86	748.43	601.69
Feb-22	165.26	151.01	0.00	175.80	492.06	277.24
Mar-22	294.92	345.28	0.00	357.62	997.82	657.58
Abr-22	159.14	144.17	0.00	174.74	478.04	246.33
May-22	41.82	0.00	0.00	146.90	188.72	94.77
Jun-22	338.88	370.11	68.13	407.24	1,184.35	596.12
Jul-22	538.25	522.05	384.38	550.65	1,995.33	350.82
Ago-22	473.95	480.59	332.77	416.33	1,703.63	465.02
Set-22	444.35	485.98	449.28	505.25	1,884.87	510.67
Oct-22	523.89	446.60	503.24	484.78	1,958.50	374.69
Nov-22	96.87	185.31	193.01	304.40	779.59	208.50
Dic-22	283.97	330.28	234.95	338.07	1,187.27	300.22
Ene-23	218.32	78.18	225.08	297.51	819.09	189.01
Feb-23	0.00	165.12	189.73	11.56	366.40	77.97
Mar-23	374.71	380.28	394.86	444.23	1,594.09	298.51
Abr-23	465.87	444.06	515.41	475.98	1,901.32	403.52

Este hallazgo evidencia que el control de las horas operativas constituye un KPI clave dentro de la etapa de perforación, debido a que permite identificar cuánto del tiempo disponible realmente se convierte en trabajo efectivo. Asimismo, el registro de horas inoperativas aporta información relevante para detectar pérdidas por detenciones, fallas, esperas o interferencias operativas, las cuales repercuten directamente en la utilización y la eficiencia.

4.1.6. Evaluación de los Kpis Operativos Actuales Frente a sus Metas (Mayo – Diciembre 2023)

Para el segundo tramo de la evaluación, correspondiente al periodo mayo – diciembre de 2023, se observó que la operación ya contaba con metas definidas para algunos KPIs críticos. En este contexto, la disponibilidad real promedio fue 85.88%, ligeramente por encima del target de 85%; la utilización promedio fue 71.25%, por debajo del target de 75%; el uso de

disponibilidad promedió 75.63%, también por debajo del target de 80%; mientras que la eficiencia promedio alcanzó 93.75%, valor cercano al estándar esperado de 94%.

Tabla 6.

Evaluación de KPIs de mayo a diciembre del 2023.

	Disp. Real	Disp. Target	Utilización	Utiliz. Target	Uso Disp	Uso. Target	Eficiencia
May-23	77%	85%	61%	75%	66%	80%	93%
Jun-23	87%	85%	72%	75%	76%	80%	94%
Jul-23	90%	85%	77%	75%	80%	80%	95%
Ago-23	90%	85%	77%	75%	81%	80%	95%
Set-23	78%	85%	79%	75%	83%	80%	95%
Oct-23	82%	85%	73%	75%	78%	80%	93%
Nov-23	92%	85%	64%	75%	69%	80%	93%
Dic-23	91%	85%	67%	75%	72%	80%	92%
Promedio Anual 2024	88%	85%	72%	75%	77%	80%	94%
Ene-24	88%	85%	71%	75%	79%	80%	90%
Feb-24	85%	85%	77%	75%	85%	80%	0%
Mar-24	88%	85%	74%	75%	82%	80%	0%

Estos resultados muestran una situación operativa mixta. Por un lado, la disponibilidad real cumplió e incluso superó la meta establecida, lo cual refleja un adecuado estado operativo de la flota. Por otro lado, la utilización y el uso de disponibilidad no lograron alcanzar sus respectivos objetivos, lo que indica que aún persistieron brechas relacionadas con el aprovechamiento real de los equipos. En consecuencia, aunque la operación mostró una eficiencia alta, está todavía estuvo condicionada por limitaciones en la utilización efectiva de la capacidad instalada.

A nivel mensual, los mejores desempeños se presentaron entre julio y agosto de 2023, meses en los que la disponibilidad real fue de 90%, la utilización llegó a 77% y el uso de disponibilidad alcanzó entre 80% y 81%, con eficiencias de 95%. En cambio, mayo de 2023 mostró la condición más desfavorable del periodo, con una disponibilidad real de 77%,

utilización de 61% y uso de disponibilidad de 66%, aunque con una eficiencia todavía elevada de 93%. Esto sugiere que, pese a que el estándar de eficiencia estaba siendo controlado, seguían existiendo restricciones operativas que impedían un mejor aprovechamiento global del sistema.

4.1.7. Evaluación del Cumplimiento de Producción y Metas Mensuales

El análisis de cierre mensual entre mayo y diciembre de 2023 permitió identificar que la perforación ejecutó 696,132.76 m, frente a un target plan mensual acumulado de 856,665.93 m, generándose una diferencia total de 160,533.17 m no ejecutados. Esto refleja que, aunque en algunos meses se lograron resultados cercanos o superiores a la meta mensual, en el acumulado general persistió un déficit productivo importante.

En términos de cumplimiento, el total mayo-diciembre de 2023 alcanzó:

- 85% de cumplimiento respecto al budget MMG,
- 77% de cumplimiento respecto al contrato OWM, y
- 81% de cumplimiento respecto al plan Mid-Year.

Estos resultados indican que, desde la perspectiva de gestión, los KPIs de cumplimiento también son relevantes dentro del sistema de control de perforación, ya que complementan a los indicadores operativos y permiten medir si el desempeño técnico realmente se traduce en logro de metas contractuales y productivas.

Tabla 7.*Cumplimiento de producción de mayo a diciembre de 2023.*

	BUDGET MMG	CONTRATO OWM	MID - YEAR (INICIO JULIO)	EJECUTADO	% Cumplimiento [Budget]	% Cumplimiento [Contrato]	% Cumplimiento [Mid Year]	Metros budget acumulados	Metros contractuales acumulados
Mayo	23,096.13	20,598.77	41,656.70	12,945.30	56%	63%	31%	23,096.13	20,598.77
Junio	93,958.60	127,712.36	109,061.15	53,063.00	56%	42%	49%	117,054.73	148,311.12
Julio	124,193.15	123,592.60	110,617.31	94,002.65	76%	76%	85%	241,247.88	271,903.73
Agosto	125,652.53	127,712.36	112,956.15	114,412.11	91%	90%	101%	366,900.42	399,616.08
Setiembre	88,025.81	127,712.36	111,857.69	102,951.04	117%	81%	92%	454,926.23	527,328.44
Octubre	118,118.46	123,592.60	115,703.08	106,758.80	90%	86%	92%	573,044.69	650,921.04
Noviembre	139,936.96	127,712.36	128,423.85	101,405.16	72%	79%	79%	712,981.65	778,633.40
Diciembre	101,667.14	123,592.60	126,390.00	110,594.70	109%	89%	88%	814,648.79	902,226.00
TOTAL, May-Dic	814,648.79	902,226.00	856,665.93	696,132.76	85%	77%	81%	814,648.79	902,226.00

Se debe resaltar que agosto y setiembre de 2023 fueron los meses con mejor comportamiento relativo. En agosto se ejecutaron 114,412.11 m, superando incluso el plan mensual de 112,956.15 m; mientras que en setiembre se alcanzaron 102,951.04 m, logrando un cumplimiento de 117% respecto al budget. Por el contrario, mayo y junio presentaron los mayores desfases, lo que evidencia una fase inicial de menor estabilidad operativa antes de la consolidación del rendimiento observado a partir del tercer trimestre.

La evaluación conjunta de los indicadores permitió establecer que la unidad minera de Apurímac actualmente emplea un sistema de control basado en KPIs que abarca productividad, desempeño mecánico, eficiencia operativa y cumplimiento de metas. No obstante, el análisis de resultados también mostró que no todos los indicadores evolucionan de manera homogénea.

La disponibilidad real fue uno de los indicadores con mejor comportamiento, manteniéndose en valores altos tanto en la base histórica como en el periodo evaluado con metas. Sin embargo, la utilización real y el uso de disponibilidad evidenciaron ser los indicadores más sensibles, debido a que en ellos se concentraron las principales brechas entre la capacidad instalada y la producción efectivamente lograda. Por ello, ambos indicadores se convierten en variables críticas para la mejora del proceso.

De forma complementaria, la eficiencia operativa mostró valores elevados cuando la utilización fue sostenida, lo que confirmó la estrecha relación entre ambos KPIs. Asimismo, los indicadores de producción mensual, cumplimiento de planes y valorización permitieron comprobar que el desempeño técnico tiene una repercusión directa sobre los resultados económicos del servicio de perforación.

En conjunto, estos hallazgos permiten afirmar que los KPIs actualmente utilizados en la unidad minera son pertinentes y funcionales para el seguimiento de la etapa de perforación;

sin embargo, su evaluación evidenció que la mejora del proceso no depende únicamente de mantener alta disponibilidad, sino de transformar dicha disponibilidad en mayor utilización efectiva, menor pérdida de metros y mayor cumplimiento de las metas mensuales de producción.

En atención al primer objetivo específico, se identificó que la unidad minera de Apurímac utiliza como principales indicadores de rendimiento la velocidad de perforación, metros perforados, disponibilidad real, utilización, uso de disponibilidad, eficiencia, horas operativas, cumplimiento de producción y valorización mensual. La evaluación de estos KPIs permitió concluir que la operación presentó una base aceptable de disponibilidad mecánica, pero con brechas persistentes en utilización y cumplimiento de producción, especialmente en determinados meses del periodo evaluado.

Del mismo modo, se determinó que la eficiencia de perforación mejora cuando existe una adecuada articulación entre disponibilidad, utilización y continuidad operacional. Por tanto, los KPIs identificados no solo describen el estado actual del proceso, sino que constituyen herramientas válidas para orientar la optimización técnica y económica de la etapa de perforación.

4.2. Optimización de la Etapa de Perforación de la Unidad Minera de Apurímac Entre los Periodos 2023 – 2024

Con el propósito de cumplir el segundo objetivo específico, se evaluó la optimización de la etapa de perforación a partir del comportamiento comparativo de los principales indicadores operativos registrados en la unidad minera de Apurímac. Para ello, se tomó como línea base el desempeño histórico comprendido entre enero de 2022 y abril de 2023, y se contrastó con el comportamiento alcanzado durante el periodo mayo a diciembre de 2023, etapa

en la cual se evidencia un cambio operativo relevante en la gestión de perforación, tanto en el control de indicadores como en la capacidad productiva instalada.

La optimización de la perforación no fue entendida únicamente como un incremento en metros ejecutados, sino como una mejora integral del proceso, expresada en una mayor velocidad de perforación, mejor utilización del equipo, incremento de la eficiencia operativa, mayor producción mensual y mejor nivel de cumplimiento respecto al plan de producción. Bajo este enfoque, el análisis permitió identificar si el proceso mostró mejoras reales en su desempeño técnico-operativo y en qué magnitud dichas mejoras se reflejaron en los resultados globales de la operación.

4.2.1. *Comparación de los Indicadores Operativos Antes y Después del Proceso de Optimización*

A partir de la información consolidada, se observó que la etapa de perforación presentó una mejora importante en sus indicadores críticos cuando se compara el periodo base enero 2022 – abril 2023 con el periodo mayo – diciembre 2023. La velocidad de perforación promedio pasó de 25.69 m/h a 31.13 m/h, mientras que la utilización del equipo aumentó de 51.11% a 71.25%. Del mismo modo, la eficiencia operativa se incrementó de 59.23% a 93.75%. En contraste, la disponibilidad real presentó una ligera reducción de 88.49% a 85.88%, aunque se mantuvo dentro de un nivel técnicamente aceptable y alineado con el target de 85%.

Tabla 8.*Comparación de KPIs operativos entre el periodo base y el periodo optimizado*

KPI	Periodo base Ene-22 a Abr-23	Periodo optimizado May- 23 a Dic-23	Variación absoluta	Variación porcentual
Velocidad de perforación (m/h)	25.69	31.13	+5.44	+21.17%
Disponibilidad real (%)	88.49	85.88	-2.61	-2.95%
Utilización (%)	51.11	71.25	+20.14	+39.40%
Uso de disponibilidad (%)	51.11*	75.63	+24.52	+47.97%
Eficiencia (%)	59.23	93.75	+34.52	+58.28%

En el periodo base no se presentó de forma separada el indicador “uso de disponibilidad”; por ello, la referencia comparativa más próxima corresponde al comportamiento de aprovechamiento operativo observado en la utilización real.

Los resultados de la Tabla 8 muestran que la optimización del proceso estuvo asociada principalmente a un mejor aprovechamiento de la capacidad operativa. Aunque la disponibilidad real disminuyó ligeramente, el incremento sustancial de la utilización y de la eficiencia demostró que el sistema logró convertir una mayor proporción del tiempo disponible en metros efectivamente perforados. En términos prácticos, esto significa que la mejora no dependió exclusivamente de tener equipos disponibles, sino de operarlos con mayor continuidad, menor tiempo improductivo y mejor organización de frentes y recursos.

La mejora más importante se evidenció en la eficiencia operativa, cuyo incremento superó el 58%, seguido del uso de disponibilidad y de la utilización del equipo. Este comportamiento sugiere que la optimización de la perforación estuvo más relacionada con

factores de gestión operativa y continuidad del proceso que con cambios estrictamente mecánicos.

4.2.2. Evolución de la Producción Mensual y del Rendimiento de Perforación

Durante el periodo mayo – diciembre de 2023, la producción ejecutada al cierre de mes alcanzó un acumulado de 696,132.76 m, mientras que los metros valorizables sumaron 674,505.76 m. Asimismo, la producción planificada para ese mismo periodo fue de 856,665.93 m, por lo que se registró un cumplimiento acumulado de 81.26% respecto al plan mensual.

A nivel mensual, el comportamiento de la producción mostró una evolución favorable luego del inicio del periodo. En mayo de 2023 se ejecutaron 12,945.30 m, mientras que en agosto se alcanzaron 114,412.11 m, constituyendo el valor más alto del periodo y superando incluso el plan mensual programado de 112,956.15 m. De forma similar, en septiembre se lograron 102,951.04 m, y en diciembre se alcanzaron 110,594.70 m, confirmando que la operación logró consolidar un mejor desempeño productivo en la segunda mitad del año.

Tabla 9.

Producción ejecutada y cumplimiento del plan mensual en el periodo mayo – diciembre 2023.

Mes	Ejecutado al cierre (m)	Plan mensual (m)	Metros perdidos (m)	Cumplimiento del plan
Mayo	12,945.30	41,656.70	28,711.40	31.08%
Junio	53,063.00	109,061.15	55,998.15	48.65%
Julio	94,002.65	110,617.31	16,614.66	84.98%
Agosto	114,412.11	112,956.15	0.00	101.29%
Septiembre	102,951.04	111,857.69	8,906.65	92.04%
Octubre	106,758.80	115,703.08	8,944.28	92.27%
Noviembre	101,405.16	128,423.85	27,018.69	78.96%
Diciembre	110,594.70	126,390.00	15,795.30	87.50%
Total	696,132.76	856,665.93	160,533.17	81.26%

La Tabla 9 evidencia que la optimización no se dio de forma lineal desde el inicio del periodo, sino que mostró una curva de maduración. Los meses de mayo y junio presentaron los menores niveles de cumplimiento, lo cual sugiere una etapa inicial de ajuste operativo. No obstante, a partir de julio, la operación ingresó en una fase de mayor estabilidad y mejor rendimiento, alcanzando su punto más alto en agosto. Esta evolución es coherente con el incremento del ROP promedio mensual, que pasó de 26 m/h en mayo a 34 m/h en octubre, manteniéndose luego en valores de 31 a 32 m/h durante noviembre y diciembre.

4.2.3. Incremento del Rendimiento por Hora y Mejora en la Capacidad de Perforación

Uno de los cambios más relevantes observados en el proceso de optimización fue la mejora de la velocidad de perforación. En el periodo mayo – diciembre de 2023, el ROP promedio mensual se ubicó en 31.13 m/h, valor superior al promedio histórico de 25.69 m/h. Esto representa un incremento de aproximadamente 21.17%, lo cual demuestra que el sistema logró elevar su capacidad efectiva de avance por hora.

La mejora del ROP se reflejó directamente en la producción mensual, debido a que permitió ejecutar mayores metros en periodos equivalentes de trabajo. Por ejemplo, durante mayo se registró un ROP promedio de 26 m/h, con 12,945.30 m ejecutados, mientras que en octubre se alcanzó un ROP de 34 m/h, acompañado de 106,758.80 m ejecutados. En ese sentido, la optimización del rendimiento por hora no solo incrementó la productividad física del proceso, sino que también fortaleció el cumplimiento mensual frente a las metas programadas.

Tabla 10.*Comportamiento mensual del ROP y producción ejecutada, mayo – diciembre 2023.*

Mes	ROP promedio (m/h)	Horas totales	Ejecutado al cierre (m)
Mayo	26	1,056	12,945.30
Junio	29	2,880	53,063.00
Julio	31	4,464	94,002.65
Agosto	33	4,968	114,412.11
Septiembre	33	5,040	102,951.04
Octubre	34	5,208	106,758.80
Noviembre	32	5,304	101,405.16
Diciembre	31	5,952	110,594.70
Promedio	31.13	4,359.00	87,016.60

Estos resultados permiten afirmar que la optimización de la perforación estuvo estrechamente vinculada a la mejora del rendimiento técnico de los equipos, reflejada en un mayor avance por hora. A su vez, el incremento de horas totales y la progresiva incorporación de equipos contribuyeron a expandir la capacidad operativa del sistema.

4.2.4. Influencia del Número de Equipos en la Optimización del Proceso

Otro aspecto relevante dentro del proceso de optimización fue el incremento del número de equipos en operación. En mayo y junio de 2023 se trabajó con 4 equipos, en julio con 6 equipos, en agosto, septiembre y octubre con 7 equipos, y en noviembre y diciembre con 8 equipos. Esta ampliación de la capacidad instalada permitió distribuir mejor la carga operativa, incrementar los metros valorizables y fortalecer la continuidad de la producción.

A pesar de ello, el análisis no mostró que el aumento de equipos, por sí solo, explicara toda la mejora. Más bien, los resultados sugieren que el crecimiento de la flota fue efectivo porque estuvo acompañado de mejores niveles de utilización, mayor ROP y un desempeño

eficiente del sistema. Esto se confirma al observar que la producción no aumentó únicamente por cantidad de equipos, sino también por la mejora simultánea de los KPIs de operación.

Tabla 11.

Evolución de equipos operativos y metros valorizables, mayo – diciembre 2023.

Mes	Número de equipos	Metros valorizables (m)	Valorizado mensual (US\$)
Mayo	4	6,089.30	57,543.89
Junio	4	48,870.40	461,825.28
Julio	6	88,962.75	840,697.99
Agosto	7	108,700.61	1,027,220.76
Septiembre	7	108,857.44	1,028,702.81
Octubre	7	100,033.00	945,311.85
Noviembre	8	107,190.56	1,012,950.79
Diciembre	8	105,801.70	999,826.07
Total	—	674,505.76	6,374,079.97

La Tabla 11 muestra que la valorización mensual creció de manera importante conforme se consolidó la optimización operativa. Mientras en mayo se valorizó US\$ 57,543.89, en agosto y septiembre la valorización superó el millón de dólares mensuales. Esto confirma que la optimización del proceso tuvo un efecto directo en el volumen valorizable y, por tanto, en el desempeño económico de la operación.

4.2.5. Evaluación de Cumplimiento Frente a Budget, Contrato y Meta Interanual

Desde la perspectiva de control de gestión, la optimización también fue evaluada mediante los porcentajes de cumplimiento respecto al budget MMG, al contrato OWM y al plan Mid-Year. En el acumulado mayo – diciembre de 2023, la operación alcanzó:

- 85% de cumplimiento respecto al budget,

- 77% respecto al contrato, y
- 81% respecto al plan Mid-Year.

Si bien estos resultados muestran que no se logró cubrir completamente la totalidad de las metas acumuladas, sí evidencian una mejora progresiva del desempeño a medida que avanzó el periodo. En particular, los mayores niveles de cumplimiento mensual se presentaron en agosto, septiembre y diciembre, lo cual confirma que la etapa de perforación fue alcanzando una condición operativa más optimizada durante la segunda mitad del año.

Tabla 12.

Cumplimiento acumulado del periodo optimizado mayo – diciembre 2023.

Indicador de control	Meta acumulada (m)	Ejecutado acumulado (m)	Cumplimiento
Budget MMG	814,648.79	696,132.76	85%
Contrato OWM	902,226.00	696,132.76	77%
Mid-Year	856,665.93	696,132.76	81%

La interpretación de estos resultados permite afirmar que la optimización del proceso fue real, aunque todavía incompleta desde la perspectiva contractual. Es decir, el sistema mejoró claramente su desempeño técnico y productivo, pero aún conservó una brecha respecto a la meta acumulada, principalmente por el bajo rendimiento de los primeros meses evaluados.

De manera integral, los resultados permiten señalar que la etapa de perforación sí presentó una optimización operativa durante el periodo evaluado. Esta mejora se manifestó en cuatro aspectos centrales: primero, un incremento del ROP promedio; segundo, una mejora sustancial en la utilización del equipo; tercero, un aumento significativo de la eficiencia operativa; y cuarto, un crecimiento importante de la producción mensual y de la valorización asociada.

La optimización observada no respondió a un solo factor aislado, sino a la interacción de varios componentes del proceso: mejor aprovechamiento del tiempo disponible, incremento de capacidad operativa mediante incorporación de equipos, mayor continuidad en la perforación y una evolución favorable del rendimiento técnico. En consecuencia, los KPIs analizados muestran que la operación pasó de una etapa con alta disponibilidad, pero bajo aprovechamiento, a una etapa con mejor articulación entre disponibilidad, utilización y producción efectiva.

No obstante, también se identificó que la optimización aún presentó limitaciones. La disponibilidad real, aunque aceptable, fue ligeramente inferior al promedio histórico. Asimismo, el cumplimiento acumulado del plan no alcanzó el 100%, debido sobre todo a los desfases de los primeros meses del periodo. Esto sugiere que la optimización fue significativa, pero todavía con margen de mejora en la estabilidad operativa y en la consolidación del cumplimiento contractual.

En atención al segundo objetivo específico, se determinó que la etapa de perforación de la unidad minera de Apurímac evidenció una optimización operativa durante el periodo evaluado. Dicha optimización se sustentó en el incremento del ROP de 25.69 m/h a 31.13 m/h, en la mejora de la utilización de 51.11% a 71.25%, y en el aumento de la eficiencia de 59.23% a 93.75%. Asimismo, la operación logró ejecutar 696,132.76 m entre mayo y diciembre de 2023, con 674,505.76 m valorizables y una valorización acumulada de US\$ 6,374,079.97.

En ese sentido, los resultados demuestran que la perforación fue optimizada en términos técnicos y productivos, aunque todavía se mantuvo una brecha frente a la meta acumulada del periodo. Por ello, puede afirmarse que la optimización fue efectiva, pero aún perfectible, especialmente en lo relacionado con el cierre de la brecha de producción y el fortalecimiento del cumplimiento contractual.

4.3. Análisis Económico del Costo Ideal, Costo Real y Reducción de Costos de Operación del Efecto de la Optimización de la Etapa de Perforación de la Unidad Minera de Apurímac entre los Periodos 2023-2024

Para el desarrollo del tercer objetivo específico se realizó el análisis económico del desempeño de la etapa de perforación a partir de la información productiva y valorizable disponible en la base de datos operativa de la unidad minera de Apurímac. En este caso, el análisis se sustentó en los registros de metros perforados, metros valorizables, valorización mensual del servicio y cumplimiento de metas de producción.

Es importante precisar que la base de datos proporcionada no presenta una desagregación detallada de costos directos por componente, tales como brocas, mantenimiento, energía, mano de obra o insumos de perforación. Por ello, el análisis económico se desarrolló bajo un enfoque operativo-financiero, en el cual el costo real fue interpretado a partir del desempeño efectivamente ejecutado y valorizado, mientras que el costo ideal fue estimado a partir de las metas de producción programadas, asumiendo el mismo esquema de valorización registrado para el periodo evaluado. En consecuencia, la reducción de costos se analizó como una disminución de la brecha económica generada por la ineficiencia operativa y por los metros dejados de ejecutar respecto a la meta esperada.

4.3.1. Base Económica del Análisis

El análisis económico se estructuró en dos momentos. El primero correspondió al periodo histórico comprendido entre enero de 2022 y abril de 2023, donde se registraron 480,417.40 m valorizables, con una valorización acumulada de US\$ 5,390,283.23. El segundo correspondió al periodo optimizado de mayo a diciembre de 2023, durante el cual se registraron 674,505.76 m valorizables, con una valorización acumulada de US\$ 6,374,079.97.

A simple vista, el segundo periodo presentó una mejora económica importante, ya que, en solo ocho meses, superó la valorización acumulada obtenida en dieciséis meses del periodo base. Sin embargo, debe señalarse que ambos periodos no operaron bajo condiciones contractuales totalmente homogéneas, pues el valor promedio por metro valorizado no fue el mismo. Mientras que en el periodo enero 2022 – abril 2023 la relación entre valorización y metros valorizables fue equivalente a US\$ 11.22 por metro, en el periodo mayo – diciembre 2023 el valor promedio registrado fue de aproximadamente US\$ 9.45 por metro. Por tanto, la comparación económica directa debe interpretarse con cautela, priorizando el análisis de productividad valorizable y de brechas frente a la meta antes que una comparación simple de tarifa unitaria.

Tabla 13.

Resumen económico comparativo entre el periodo base y el periodo optimizado.

Periodo	Metros valorizables (m)	Valorización acumulada (US\$)	Número de meses	Promedio mensual de metros valorizables (m/mes)	Promedio mensual valorizado (US\$/mes)	Valor promedio por metro (US\$/m)
Ene-22 a Abr-23	480,417.40	5,390,283.23	16	30,026.09	336,892.70	11.22
May-23 a Dic-23	674,505.76	6,374,079.97	8	84,313.22	796,759.99	9.45

Los resultados de la Tabla 13 evidencian que la optimización del proceso tuvo un efecto económico positivo sobre la capacidad de valorización del servicio. Aun cuando la tarifa promedio por metro del segundo periodo fue menor, la producción valorizable mensual aumentó de 30,026.09 m/mes a 84,313.22 m/mes, mientras que la valorización mensual promedio creció de US\$ 336,892.70 a US\$ 796,759.99. Esto indica que la mejora operativa permitió compensar la menor tarifa unitaria mediante un volumen significativamente mayor de producción valorizable.

4.3.2. *Determinación del Escenario Real y del Escenario Ideal*

Para el periodo optimizado mayo – diciembre de 2023, el escenario real estuvo representado por la producción efectivamente valorizable de 674,505.76 m, con una valorización acumulada de US\$ 6,374,079.97. En cambio, el escenario ideal fue estimado sobre la base del cumplimiento total del plan mensual acumulado, equivalente a 856,665.93 m.

Tomando como referencia el valor promedio real de US\$ 9.45 por metro valorizable durante el periodo optimizado, el escenario ideal habría representado una valorización equivalente de US\$ 8,095,993.04. Por tanto, la diferencia entre el escenario ideal y el escenario real asciende a US\$ 1,721,913.07, monto que representa la valorización no capturada por no haber alcanzado la producción programada.

Tabla 14.

Escenario económico real e ideal del periodo mayo – diciembre 2023.

Escenario	Metros (m)	Valor promedio (US\$/m)	Valorización estimada (US\$)
Real valorizable	674,505.76	9.45	6,374,079.97
Ideal según plan mensual	856,665.93	9.45	8,095,993.04
Brecha económica	182,160.17	9.45	1,721,913.07

La Tabla 14 muestra que la optimización del proceso sí elevó de manera sustancial la producción y la valorización; no obstante, todavía subsistió una brecha importante respecto al nivel ideal de cumplimiento. Desde una perspectiva económica, esta brecha puede interpretarse como un costo de ineficiencia operativa, es decir, el valor que la operación dejó de capturar por no convertir toda su capacidad programada en metros efectivamente valorizables.

4.3.3. Evaluación del Desempeño Económico Frente al Budget, Contrato y Plan Mensual

Además del plan mensual, la operación fue comparada con otras referencias de gestión económica: el budget MMG y el contrato OWM. En el acumulado del periodo mayo – diciembre de 2023, la producción ejecutada alcanzó 696,132.76 m, frente a un budget acumulado de 814,648.79 m, un contrato acumulado de 902,226.00 m y un plan mensual acumulado de 856,665.93 m.

Esto permitió identificar déficits de 118,516.03 m respecto al budget, 206,093.24 m respecto al contrato y 160,533.17 m respecto al plan mensual. Si estas brechas se expresan económicamente con el valor promedio de US\$ 9.45/m, se obtiene una brecha valorizable no capturada de US\$ 1,119,976.48, US\$ 1,947,581.12 y US\$ 1,517,038.46, respectivamente.

Tabla 15.

Brecha económica según referencias de control, mayo – diciembre 2023.

Referencia	Meta acumulada (m)	Ejecutado acumulado (m)	Déficit (m)	Valor promedio (US\$/m)	Brecha económica (US\$)
Budget MMG	814,648.79	696,132.76	118,516.03	9.45	1,119,976.48
Contrato OWM	902,226.00	696,132.76	206,093.24	9.45	1,947,581.12
Plan mensual	856,665.93	696,132.76	160,533.17	9.45	1,517,038.46

Los resultados de la Tabla 15 permiten afirmar que la optimización observada en la etapa de perforación generó una mejora económica real, pero todavía no suficiente para cerrar completamente la brecha frente a los compromisos de producción. El mayor diferencial económico se registró respecto al contrato acumulado, lo cual indica que, aunque la operación

mostró un avance técnico significativo, el volumen ejecutado todavía no alcanzó la magnitud necesaria para maximizar el beneficio contractual del periodo.

4.3.4. *Análisis de la Valorización Mensual y Comportamiento de la Brecha Económica*

A nivel mensual, la valorización del servicio mostró una evolución favorable durante el periodo mayo – diciembre de 2023. Los valores más bajos se registraron en mayo, con US\$ 57,543.89, y en junio, con US\$ 461,825.28. En contraste, a partir de julio la valorización mostró un incremento importante, superando los US\$ 840,000 mensuales y alcanzando valores mayores a US\$ 1,000,000 en agosto, septiembre y noviembre.

Este comportamiento evidencia que la optimización del proceso tuvo un efecto acumulativo. En los primeros meses del periodo persistieron desfases significativos entre el plan y la ejecución, mientras que en los meses posteriores la operación logró estabilizarse y acercarse más al nivel esperado de producción. En términos económicos, ello significa que la brecha de valorización fue mucho más intensa en la fase inicial y tendió a reducirse conforme mejoraron el ROP, la utilización y la eficiencia de perforación.

Tabla 16.

Evolución de la valorización mensual del periodo optimizado

Mes	Metros valorizables (m)	Valorizado mensual (US\$)
Mayo	6,089.30	57,543.89
Junio	48,870.40	461,825.28
Julio	88,962.75	840,697.99
Agosto	108,700.61	1,027,220.76
Septiembre	108,857.44	1,028,702.81
Octubre	100,033.00	945,311.85
Noviembre	107,190.56	1,012,950.79
Diciembre	105,801.70	999,826.07
Total	674,505.76	6,374,079.97

La Tabla 16 confirma que la optimización tuvo una incidencia económica directa sobre la valorización del servicio. Entre mayo y agosto, la valorización mensual creció de US\$

57,543.89 a US\$ 1,027,220.76, lo que representa un incremento sustancial en la capacidad de facturación operativa. Si bien esta mejora también estuvo asociada al aumento del número de equipos y a la consolidación del proceso, no puede desligarse de la mejora observada en los KPIs técnicos, especialmente en la velocidad de perforación, utilización y eficiencia.

Desde el enfoque adoptado en esta investigación, el costo real de la operación se reflejó en el nivel de producción efectivamente ejecutada y valorizada, mientras que el costo ideal se asoció al escenario en que dicha operación hubiera cumplido completamente la meta acumulada. En consecuencia, la diferencia entre ambos no debe interpretarse únicamente como menor ingreso, sino también como una expresión de la ineficiencia operativa del proceso.

En esa lógica, la optimización de la etapa de perforación contribuyó a reducir el costo operativo equivalente por ineficiencia, al incrementar la producción valorizable mensual y disminuir la distancia respecto a las metas programadas. Aunque la operación no alcanzó el 100% del plan acumulado, sí logró reducir progresivamente la brecha económica durante el segundo semestre del año, mostrando que la mejora de los KPIs operativos tuvo un efecto favorable sobre el desempeño financiero del servicio.

Asimismo, al incrementarse el volumen de metros valorizables, es razonable inferir que los costos fijos del sistema tendieron a distribuirse sobre una mayor producción, lo que contribuye a disminuir el costo unitario operativo efectivo por metro perforado. Si bien esta reducción no pudo cuantificarse en términos contables desagregados por falta de información detallada de costos directos, los resultados económicos muestran con claridad que el incremento del rendimiento operativo elevó la valorización total y mejoró la absorción económica de la operación.

En atención al tercer objetivo específico, se determinó que el efecto de la optimización de la etapa de perforación se reflejó en una mejora económica tangible del proceso. Durante el

periodo mayo – diciembre de 2023 se obtuvieron 674,505.76 m valorizables, equivalentes a US\$ 6,374,079.97, con un promedio de US\$ 796,759.99 por mes. No obstante, al comparar este resultado con el escenario ideal del plan mensual acumulado, se identificó una brecha de 182,160.17 m, equivalente a US\$ 1,721,913.07 de valorización no capturada.

Asimismo, respecto al budget acumulado y al contrato, la operación presentó déficits valorizables equivalentes a US\$ 1,119,976.48 y US\$ 1,947,581.12, respectivamente. Estos resultados permiten concluir que la optimización del proceso sí mejoró el desempeño económico de la perforación, pero aún no fue suficiente para alcanzar el nivel ideal de producción programada. En consecuencia, la reducción de costos operativos se evidenció principalmente en la disminución progresiva de la ineficiencia operativa y en la mayor capacidad de valorización obtenida a partir de la mejora de los indicadores de rendimiento.

4.4. Discusión de Resultados

La presente investigación tuvo como finalidad analizar el efecto de la optimización de la etapa de perforación en la unidad minera de Apurímac durante el periodo 2023–2024, considerando tanto los indicadores operativos de desempeño como los resultados económicos asociados al proceso de perforación. A partir de los resultados obtenidos, se evidencia que la mejora del rendimiento operativo de los equipos de perforación influyó directamente en el incremento de la productividad del proceso y en la valorización económica del servicio de perforación.

En ese sentido, los resultados obtenidos muestran coincidencias importantes con investigaciones previas desarrolladas tanto en el ámbito internacional como nacional, las cuales también evidencian que la optimización de parámetros operativos y el uso de indicadores de desempeño permiten mejorar significativamente la eficiencia del proceso de perforación y reducir los costos operativos en actividades mineras.

En primer lugar, respecto a los resultados operativos obtenidos en la presente investigación, se identificó que la velocidad promedio de perforación se incrementó de 25.69 m/h a 31.13 m/h, asociado a un cambio en el diámetro de la broca desde el periodo “mayo 2023”, lo que representa un aumento aproximado de 21.17%. Asimismo, se observó una mejora significativa en la utilización de equipos, pasando de 51.11% a 71.25%, así como un incremento en la eficiencia operativa, que pasó de 59.23% a 93.75%. Estos resultados demuestran que el proceso de optimización permitió mejorar el aprovechamiento del tiempo operativo disponible y reducir los tiempos improductivos asociados a la operación de perforación.

Estos hallazgos coinciden con lo reportado por Puma & Llerena (2021), quienes en su estudio realizado en la Sociedad Minera Los Caprichosos Reina del Rosario en Ecuador evidenciaron que la optimización del diseño de perforación mediante el modelo matemático de Holmberg permitió incrementar el avance de los frentes de perforación en 9.66%, además de mejorar la velocidad de perforación y reducir los tiempos muertos del proceso. De manera similar a lo observado en la presente investigación, los autores concluyen que la optimización de los parámetros operativos y geomecánicos contribuye directamente a mejorar la productividad y a reducir el consumo de recursos durante las operaciones de perforación.

Asimismo, los resultados obtenidos en esta investigación también guardan relación con lo reportado por Vera & Verdezoto (2020), quienes analizaron la optimización de parámetros de perforación mediante indicadores de desempeño (KPI) en pozos petrolíferos del campo Tambococha en Ecuador. En dicho estudio, la implementación de indicadores como tasa de penetración, eficiencia de perforación y tiempos no productivos permitió reducir los costos operativos en diferentes secciones del proceso, alcanzando reducciones de hasta 14% en la primera sección de perforación. En comparación con dichos resultados, el incremento de la

velocidad de perforación y de la eficiencia operativa observado en la presente investigación confirma que el uso de indicadores operativos constituye una herramienta clave para el control y mejora del desempeño en operaciones de perforación.

De igual forma, los resultados obtenidos también son coherentes con lo señalado por Buele (2017), quien evaluó la optimización de parámetros de perforación y voladura en el avance de túneles en la mina Cabo de Hornos en Ecuador. En su investigación se evidenció que la implementación de un diseño optimizado de malla de perforación permitió incrementar la eficiencia del avance de 83% a 95%, reduciendo simultáneamente el consumo de explosivos y los costos operativos. En ese sentido, tanto el estudio de Buele como la presente investigación coinciden en que la optimización de los parámetros operativos permite mejorar el rendimiento del proceso de perforación y generar beneficios económicos para la operación minera.

En el contexto nacional, los resultados obtenidos también presentan similitudes con lo reportado por Santos (2024), quien evaluó la influencia de los indicadores clave de desempeño en la reducción de costos operativos de perforación y voladura en una empresa minera de la región La Libertad. El autor identificó que la implementación de indicadores relacionados con la utilización de equipos, el avance de perforación y la confiabilidad operativa permitió reducir hasta en 79% las pérdidas de costos operativos, además de incrementar la producción en 63% durante los primeros diez meses de implementación. Estos resultados guardan relación con lo observado en la presente investigación, donde el incremento en la utilización y eficiencia operativa permitió mejorar la producción mensual de perforación y aumentar la valorización económica del servicio.

De manera similar, Rodríguez et al. (2023), evaluaron la reducción de costos operativos mediante la optimización de indicadores de desempeño en la unidad minera Francés de Patate. Los autores reportaron que la aplicación de nuevos indicadores operativos permitió reducir el

costo de perforación y voladura de 681.07 US\$/m a 615.08 US\$/m, además de incrementar la tasa de penetración en 6.08% y mejorar el avance por disparo. En comparación con dichos resultados, la presente investigación también evidenció que la mejora en la velocidad de perforación y en la utilización de equipos permitió incrementar significativamente el rendimiento operativo del proceso, lo que a su vez contribuyó a mejorar el desempeño económico de la operación.

Por otro lado, el análisis económico realizado en esta investigación permitió identificar que durante el periodo optimizado mayo – diciembre de 2023 se obtuvieron 674,505.76 metros valorizables, generando una valorización acumulada de US\$ 6,374,079.97. Este resultado evidencia un incremento significativo en la capacidad de valorización del proceso en comparación con el periodo base, donde se obtuvieron 480,417.40 metros valorizables con una valorización acumulada de US\$ 5,390,283.23. Esto demuestra que la optimización del proceso de perforación tuvo un impacto positivo en el desempeño económico de la operación.

Sin embargo, también se identificó que aún existe una brecha entre la producción ejecutada y la producción programada. En el periodo mayo – diciembre de 2023 se registró una producción ejecutada de 696,132.76 metros, mientras que el plan mensual acumulado establecía una meta de 856,665.93 metros, lo que representa un déficit de 160,533.17 metros. Esta brecha equivale a una valorización potencial no capturada aproximada de US\$ 1.72 millones, considerando el valor promedio de valorización registrado durante el periodo.

Este comportamiento también fue observado por Rodríguez et al. (2023), quienes señalaron que, a pesar de la implementación de indicadores de optimización, factores como la falta de coordinación operativa, la limitada disponibilidad de equipos y la ausencia de planes de mantenimiento preventivo pueden afectar el cumplimiento de las metas de producción programadas. De manera similar, en la presente investigación se identificó que los meses

iniciales del periodo evaluado presentaron menores niveles de cumplimiento del plan mensual, lo que sugiere que el proceso de optimización requiere un periodo de adaptación antes de alcanzar su máximo rendimiento.

Asimismo, los resultados obtenidos también muestran cierta relación con lo señalado por Cuellar & Valverde (2022), quienes indicaron que la optimización de parámetros técnicos en perforación y voladura no siempre se traduce automáticamente en una mejora total del proceso, debido a la influencia de factores externos relacionados con la geología, la coordinación operativa y las condiciones de trabajo en campo. En su investigación, los autores observaron que, a pesar de la mejora en los indicadores de voladura, se presentó un incremento de 9.41% en la sobrerotura, lo cual evidencia que la optimización de un proceso operativo debe evaluarse de manera integral considerando múltiples variables.

En términos generales, los resultados obtenidos en la presente investigación confirman que la optimización de los indicadores operativos de perforación contribuye significativamente a mejorar la eficiencia del proceso, reducir costos de perforación, incrementar la productividad y fortalecer el desempeño económico de la operación minera. No obstante, también se evidencia que la optimización operativa debe complementarse con una adecuada planificación de la producción, una coordinación eficiente entre las áreas operativas y un sistema de mantenimiento preventivo que permita garantizar la disponibilidad continua de los equipos de perforación.

En consecuencia, los resultados obtenidos en la presente investigación se alinean con la literatura existente sobre optimización de procesos de perforación en minería, confirmando que la aplicación de indicadores de desempeño, la mejora de los parámetros operativos y el control sistemático de la producción constituyen herramientas fundamentales para incrementar la eficiencia y la rentabilidad de las operaciones mineras.

CONCLUSIONES

Respecto al objetivo general, se logró aplicar indicadores de rendimiento (KPI) para evaluar el comportamiento operativo de la etapa de perforación en la unidad minera de Apurímac durante el periodo 2023–2024, identificándose que los indicadores de velocidad de perforación, utilización de equipos, eficiencia operativa y disponibilidad permitieron analizar de manera objetiva el desempeño del proceso. A partir de su aplicación se evidenció que la optimización de dichos indicadores contribuyó a mejorar la productividad del sistema de perforación, incrementando la velocidad promedio de perforación de 25.69 m/h a 31.13 m/h, lo que representó una mejora aproximada del 21.17%, además de incrementar la utilización de equipos de 51.11% a 71.25% y la eficiencia operativa de 59.23% a 93.75%, demostrando que el uso de KPI constituye una herramienta efectiva para el control y mejora del rendimiento operativo en operaciones de perforación minera.

Respecto al primer objetivo específico, se identificaron y evaluaron los principales indicadores de rendimiento utilizados en la etapa de perforación de la unidad minera de Apurímac, los cuales corresponden a la velocidad de penetración o ROP, disponibilidad real de equipos, utilización operativa, uso de disponibilidad y eficiencia operativa. El análisis de estos indicadores permitió establecer una línea base del desempeño del proceso durante el periodo enero 2022 – abril 2023, donde se registró un ROP promedio de 25.69 m/h, una disponibilidad de 88.49%, una utilización de 51.11% y una eficiencia operativa de 59.23%, evidenciando la existencia de tiempos improductivos y limitaciones en el aprovechamiento de la capacidad operativa instalada.

Respecto al segundo objetivo específico, se determinó que la optimización de la etapa de perforación durante el periodo mayo – diciembre de 2023 permitió mejorar significativamente el desempeño operativo del proceso. Como resultado de la optimización se

logró incrementar la velocidad promedio de perforación a 31.13 m/h, elevar la utilización de equipos a 71.25% y aumentar la eficiencia operativa a 93.75%, lo que permitió ejecutar 696,132.76 metros perforados y 674,505.76 metros valorizables durante el periodo evaluado. Asimismo, se observó una mejora progresiva en el cumplimiento del plan mensual, especialmente durante el segundo semestre del año, evidenciando que la optimización del proceso contribuyó a incrementar la productividad y el aprovechamiento de los recursos operativos.

Respecto al tercer objetivo específico, el análisis económico permitió determinar que la optimización de la etapa de perforación generó un impacto positivo en la valorización económica de la operación. Durante el periodo mayo – diciembre de 2023 se obtuvo una valorización acumulada de US\$ 6,374,079.97, con un promedio mensual de aproximadamente US\$ 796,759.99, lo que representa un incremento significativo respecto al periodo base. No obstante, al comparar la producción ejecutada con la meta acumulada del plan mensual (856,665.93 m), se identificó una brecha de 160,533.17 metros, equivalente a aproximadamente US\$ 1.72 millones de valorización potencial no capturada, lo que evidencia que, aunque la optimización mejoró el desempeño económico del proceso, aún existen oportunidades de mejora para alcanzar el nivel ideal de producción programada.

Finalmente, se concluye que la aplicación sistemática de indicadores de rendimiento en la etapa de perforación constituye una herramienta fundamental para el control de la productividad, la reducción de tiempos improductivos y la mejora del desempeño económico de la operación minera. La optimización de los parámetros operativos permitió incrementar la eficiencia del proceso y mejorar la valorización del servicio de perforación; sin embargo, también se identificó la necesidad de fortalecer la planificación operativa, la coordinación entre

áreas y la gestión de mantenimiento de equipos para reducir la brecha existente entre la producción ejecutada y la producción programada.



RECOMENDACIONES

Primera. Se recomienda que futuras investigaciones en el área de ingeniería de minas continúen profundizando en la aplicación de indicadores de rendimiento (KPI) en las operaciones unitarias de perforación y voladura, incorporando herramientas de análisis estadístico y modelos de simulación que permitan evaluar con mayor precisión la relación entre los indicadores operativos y la reducción de costos de producción en unidades mineras.

Segunda. Se sugiere que en estudios posteriores se amplíe el análisis de los indicadores de rendimiento incorporando variables adicionales relacionadas con la confiabilidad mecánica de los equipos, la gestión del mantenimiento preventivo y el control de los tiempos no productivos, con el propósito de obtener una evaluación más integral del desempeño operativo de las etapas de perforación en minería.

Tercera. Se recomienda que futuras investigaciones consideren el análisis comparativo de diferentes métodos de optimización de perforación, tales como el uso de modelos matemáticos, algoritmos de optimización o sistemas de monitoreo digital, con el fin de evaluar su impacto en la mejora de la velocidad de perforación, la utilización de equipos y la eficiencia operativa del proceso.

Cuarta. Se sugiere que próximos estudios desarrollen análisis económicos más detallados que incluyan la desagregación de los costos operativos de perforación, tales como costos de brocas, energía, mantenimiento, mano de obra y consumibles, lo que permitirá estimar con mayor precisión el costo real por metro perforado y evaluar con mayor exactitud el impacto económico de las estrategias de optimización.

Quinta. Finalmente, se recomienda que futuras investigaciones amplíen el periodo de evaluación de los indicadores de rendimiento y de los resultados económicos de la operación,

considerando periodos operativos más extensos y diferentes contextos geológicos, con el propósito de validar la sostenibilidad de los procesos de optimización y fortalecer la toma de decisiones en la gestión de operaciones mineras.



Rodriguez, J. A., Asesor, A., Manuel, I. E., & Vidal, N. (2023). “*REDUCCIÓN DE LOS COSTOS OPERATIVOS EN MINA MEDIANTE LA OPTIMIZACIÓN DE LOS INDICADORES CLAVE DE DESEMPEÑO (KPI) DE LAS OPERACIONES UNITARIAS DE PERFORACIÓN Y VOLADURA.*” Universidad Privada del Norte.

Santos, J. (2024). *INFLUENCIA DE LOS KPI'S EN LA REDUCCIÓN DE COSTOS OPERATIVOS DE PERFORACIÓN Y VOLADURA EN UNA PEQUEÑA EMPRESA MINERA DE LA REGIÓN LA LIBERTAD* [Universidad Privada del Norte]. <https://hdl.handle.net/11537/36686>

Vera, M., & Verdezoto, C. (2020). *Estudio técnico económico para optimización de parámetros de perforación a través de análisis de KPI, en los pozos del campo Tambococha, en el periodo noviembre 2018 - noviembre 2018.* UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR.