



Universidad Católica de Santa María

Facultad de Ciencias e Ingenierías Físicas y Formales

Escuela Profesional de Ingeniería de Minas

**Modelo de mejora para la optimización de tiempos de perforación diamantina
a través del software Arena en una unidad minera al sur del Perú - 2024**

Tesis presentada por:

Navarro Vargas, Brenon Marco

ORCID: 0009-0001-4055-6594

para optar el Título Profesional de Ingeniero de Minas

Asesor:

Mg. Barreda de la Cruz, Miguel Alberto

ORCID: 0000-0002-9329-4460

Arequipa – Perú

2026

UCSM-ERP

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

INGENIERIA DE MINAS

TITULACIÓN CON TESIS

DICTAMEN APROBACIÓN DE BORRADOR

Arequipa, 26 de Marzo del 2026

Dictamen: 015391-C-EPIM-2026

Visto el borrador del expediente 015391, presentado por:

2015243741 - NAVARRO VARGAS BRENON MARCO

Titulado:

MODELO DE MEJORA PARA LA OPTIMIZACIÓN DE TIEMPOS DE PERFORACIÓN DIAMANTINA A TRAVÉS DEL SOFTWARE ARENA EN UNA UNIDAD MINERA AL SUR DEL PERÚ - 2024

Nuestro dictamen es:

APROBADO

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

INGENIERO DE MINAS

**40902304 - LINARES FLORES CASTRO ANTONIO ERICK
DICTAMINADOR**



**40656104 - LOPEZ CASAPERALTA DE DIAZ PATRICIA YANETH
DICTAMINADOR**



**40379481 - PAREDES SALAS OMAR WILLY
DICTAMINADOR**



MODELO DE MEJORA PARA LA OPTIMIZACIÓN DE TIEMPOS DE PERFORACIÓN DIAMANTINA A TRAVÉS DEL SOFTWARE ARENA EN UNA UNIDAD MINERA AL SUR DEL PERÚ - 2024

INFORME DE ORIGINALIDAD

19%

INDICE DE SIMILITUD

18%

FUENTES DE INTERNET

5%

PUBLICACIONES

11%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	repositorioacademico.upc.edu.pe	3%
	Fuente de Internet	
2	Submitted to Universidad Católica de Santa María	2%
	Trabajo del estudiante	
3	hdl.handle.net	2%
	Fuente de Internet	
4	www.coursehero.com	1%
	Fuente de Internet	
5	Submitted to Instituto Superior de Artes, Ciencias y Comunicación IACC	1%
	Trabajo del estudiante	
6	Submitted to Universidad Cesar Vallejo	1%
	Trabajo del estudiante	
7	apirepositorio.unh.edu.pe	<1%
	Fuente de Internet	

repositorio.unab.cl

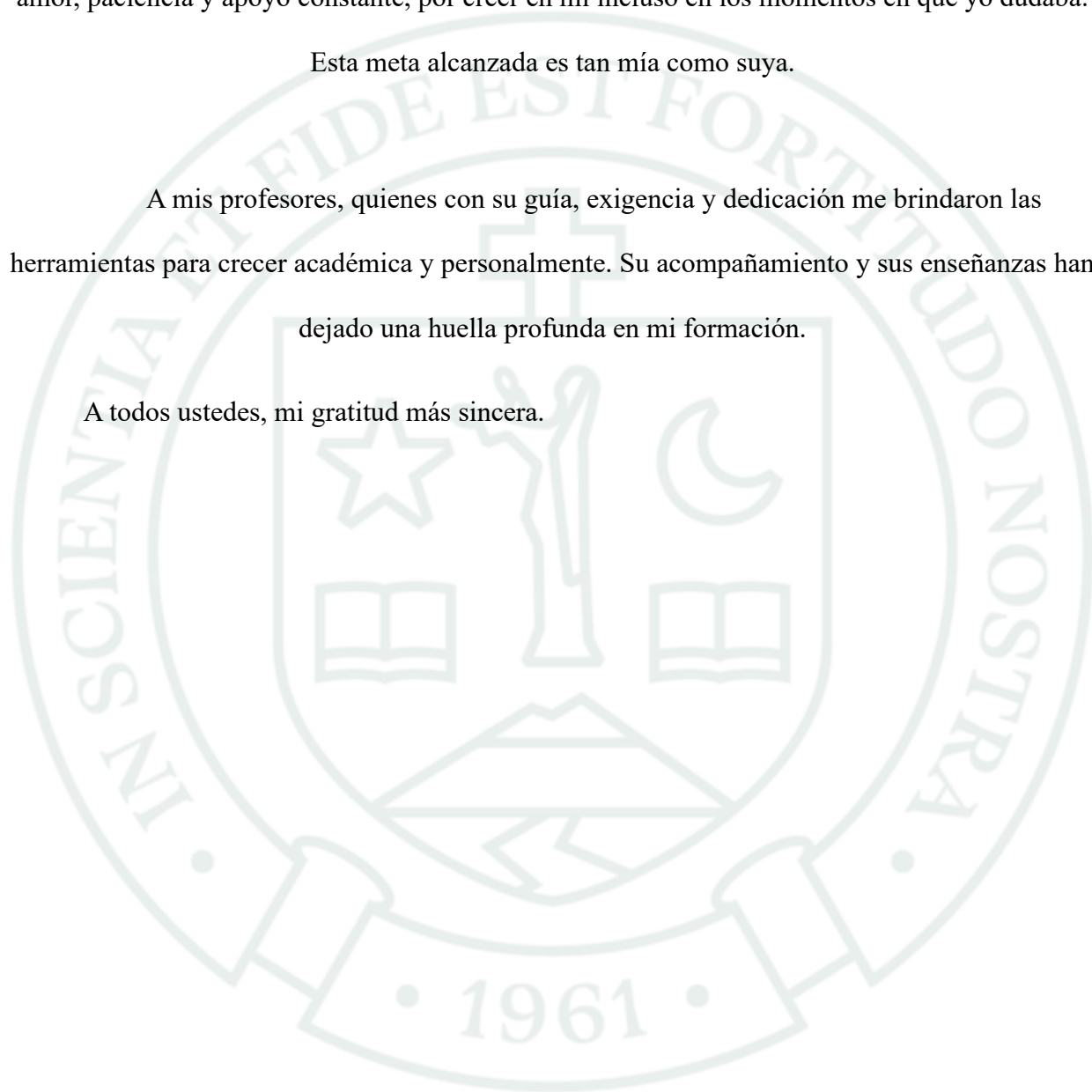
DEDICATORIA

A mi familia, por ser mi sostén incondicional en cada etapa de este camino. Gracias por su amor, paciencia y apoyo constante, por creer en mí incluso en los momentos en que yo dudaba.

Esta meta alcanzada es tan mía como suya.

A mis profesores, quienes con su guía, exigencia y dedicación me brindaron las herramientas para crecer académica y personalmente. Su acompañamiento y sus enseñanzas han dejado una huella profunda en mi formación.

A todos ustedes, mi gratitud más sincera.

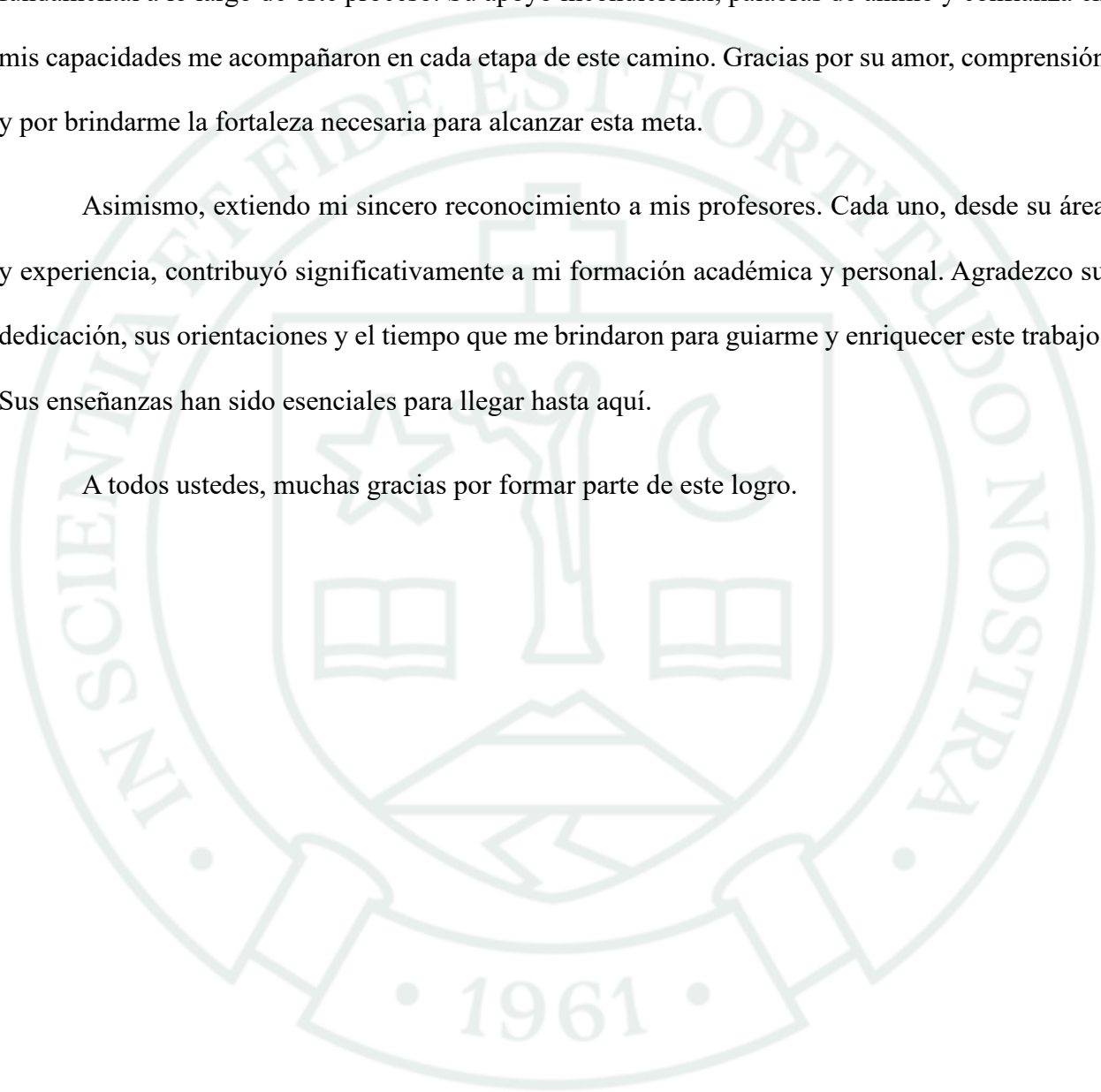


AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a mi familia, quienes han sido el pilar fundamental a lo largo de este proceso. Su apoyo incondicional, palabras de ánimo y confianza en mis capacidades me acompañaron en cada etapa de este camino. Gracias por su amor, comprensión y por brindarme la fortaleza necesaria para alcanzar esta meta.

Asimismo, extendo mi sincero reconocimiento a mis profesores. Cada uno, desde su área y experiencia, contribuyó significativamente a mi formación académica y personal. Agradezco su dedicación, sus orientaciones y el tiempo que me brindaron para guiarme y enriquecer este trabajo. Sus enseñanzas han sido esenciales para llegar hasta aquí.

A todos ustedes, muchas gracias por formar parte de este logro.



EPÍGRAFE

“No se llega a la cima superando a los demás, sino superándose a uno mismo”



RESUMEN

La perforación diamantina constituye una etapa fundamental dentro de los procesos de exploración minera, debido a que permite obtener testigos continuos del subsuelo que sirven para la caracterización geológica, estructural y geoquímica de los yacimientos. Sin embargo, en diversas operaciones mineras del sur del Perú se han identificado deficiencias operativas significativas que reducen la productividad y elevan los costos del proceso. Entre los problemas más críticos se encuentran el incumplimiento del avance programado establecido en 20 metros por máquina y por turno, la presencia de tiempos muertos excesivos y pérdidas económicas que ascienden a aproximadamente 5 000 dólares por ciclo, afectando la continuidad operativa y la planificación minera. Estas ineficiencias se relacionan con paradas no programadas, gestión inadecuada de herramientas, mantenimiento deficiente y diversas interrupciones clasificadas como stand by operativo, inoperativo o atribuible al cliente.

Ante este escenario, la investigación plantea el desarrollo de un modelo de mejora basado en técnicas de ingeniería de métodos y en la simulación computacional mediante el software Arena. En una primera fase, se recopilaron 660 reportes operativos generados por 11 máquinas perforadoras durante un periodo de 30 días, registrando tiempos efectivos e improductivos, metros perforados y secuencia de actividades. Estos datos permitieron caracterizar el estado actual (*AS IS*) del proceso e identificar las causas principales de la pérdida de eficiencia, entre las cuales destacan el retiro de tuberías, fallas mecánicas, condiciones de terreno adversas, actividades manuales de acondicionamiento y tiempos prolongados de mantenimiento correctivo y preventivo.

Posteriormente, se aplicaron herramientas de ingeniería de métodos como el Diagrama de Análisis de Procesos (DAP), el diagrama Hombre Máquina y estudios de tiempos, con el fin de cuantificar y clasificar las actividades productivas, contributivas e improductivas. Este análisis

permitió establecer una brecha técnica entre la producción proyectada y la producción real, mostrando que las máquinas perforadoras alcanzaban en promedio solo 7.5 metros por turno, muy por debajo del objetivo.

Con los datos obtenidos, se construyó un modelo de simulación representando el proceso real en Arena, donde se integraron las actividades clave del ciclo de perforación: preparación del equipo, perforación activa, cambios de herramienta, acondicionamiento de sondaje, mantenimiento y cierre de turno. Este modelo permitió visualizar los cuellos de botella y analizar la disponibilidad de los recursos principales, especialmente el *taladro*, cuyo nivel de utilización alcanzó un 90%. Una vez validado el modelo AS IS, se diseñó un modelo optimizado (*TO BE*) introduciendo mejoras como la reorganización de secuencias operativas, estandarización de actividades, reducción de tiempos ociosos, mejor uso del personal y control más estricto del mantenimiento.

Del análisis comparativo entre ambos modelos se obtuvieron resultados significativos: la producción aumentó de 7.5 a 11.2 metros por turno (incremento del 49.3%), el tiempo improductivo mensual se redujo de 132 a 68 horas (48.5% menos), y el tiempo estándar por turno disminuyó en más de 80 minutos. Asimismo, el costo operativo por ciclo se redujo en 15.3%, pasando de 30 000 a 25 400 dólares. En términos económicos, el proyecto presentó un VAN positivo de S/ 203 000 y una TIR de 42%, confirmando la viabilidad financiera de implementar las mejoras propuestas.

Además, se llevó a cabo una comparación técnica entre Arena y otros softwares de simulación utilizados en minería, como Simio, AnyLogic, Vulcan y MineSched. Los resultados mostraron que Arena posee mayores ventajas para modelar procesos cíclicos, secuenciales y basados en eventos discretos, como la perforación diamantina. Su facilidad de uso, costo moderado y capacidad de modelado detallado lo posicionan como la herramienta más adecuada para este tipo de análisis operativos.

En conjunto, la investigación demuestra que la integración de ingeniería de métodos con simulación computacional permite no solo identificar y cuantificar las causas de ineficiencia, sino también proyectar con alto nivel de precisión el impacto de medidas de mejora antes de implementarlas en campo. El modelo propuesto es replicable en otras unidades mineras y representa una herramienta estratégica para incrementar la productividad, reducir costos y mejorar la toma de decisiones basadas en datos reales.

Palabras clave: Perforación diamantina, simulación en Arena, Optimización de tiempos.



ABSTRACT

Diamond drilling is a fundamental stage in mining exploration, as it enables the extraction of continuous core samples that support geological, structural, and geochemical characterization of deposits. However, several mining operations in southern Peru have reported significant operational deficiencies that reduce productivity and increase process costs. The most critical issues include failure to meet the programmed advance rate set at 20 meters per machine per shift excessive downtime, and economic losses reaching approximately 5,000 USD per cycle. These inefficiencies stem from unplanned stoppages, inadequate tool management, deficient maintenance, and interruptions classified as operational, non-operational, or client-related stand-by events.

In response, this research develops an improvement model based on methods engineering techniques and computational simulation using the Arena software. In the first phase, 660 operational reports generated by 11 drilling machines over a 30-day period were collected, documenting effective and non-productive times, meters drilled, and activity sequences. These data allowed the characterization of the current state (*AS IS*) of the drilling process and the identification of the main factors contributing to inefficiency, such as pipe removal, mechanical failures, adverse ground conditions, manual conditioning tasks, and extended corrective and preventive maintenance times.

Methods engineering tools such as the Process Analysis Diagram (DAP), Man Machine Diagram, and time studies were then applied to quantify and classify productive, contributive, and non-productive activities. This analysis revealed a technical gap between projected and actual production, showing that the drilling machines averaged only 7.5 meters per shift—well below the established goal.

Using the collected data, a simulation model representing the real process was constructed in Arena. The model incorporated key drilling cycle activities: equipment preparation, active drilling, tool changes, hole conditioning, maintenance, and shift closure. This simulation made it possible to visualize bottlenecks and assess the availability of critical resources, especially the drill rig, which reached a utilization rate of 90%. After validating the AS IS model, an optimized model (*TO BE*) was designed by reorganizing operational sequences, standardizing activities, reducing idle time, improving workforce allocation, and tightening maintenance control.

The comparative analysis between both models yielded significant improvements: production increased from 7.5 to 11.2 meters per shift (a 49.3% rise), monthly non-productive hours dropped from 132 to 68 (a 48.5% reduction), and standard time per shift decreased by more than 80 minutes. Additionally, operational cost per cycle dropped by 15.3%, from 30,000 to 25,400 USD. Economically, the project presented a positive Net Present Value (NPV) of S/. 203,000 and an Internal Rate of Return (IRR) of 42%, confirming the feasibility of implementing the proposed improvements.

A technical comparison between Arena and other simulation tools used in the mining industry, such as Simio, AnyLogic, Vulcan, and MineSched, revealed that Arena offers greater advantages for modeling cyclical, sequential, and discrete-event processes like diamond drilling. Its ease of use, moderate cost, and capacity for detailed modeling position it as the most suitable tool for operational mining analysis.

Overall, the research demonstrates that combining methods engineering with computational simulation not only identifies and quantifies inefficiencies but also predicts the impact of improvement measures before implementing them in the field. The proposed model is replicable

in other mining units and serves as a strategic tool for increasing productivity, reducing costs, and improving data-driven decision-making.

Keywords: Diamond drilling, arena simulation, time optimization.



ÍNDICE

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTOS

EPÍGRAFE

RESUMEN

ABSTRACT

INTRODUCCIÓN 1

CAPÍTULO I..... 3

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 4

1.1 Determinación del problema 4

1.2 Objetivo del proyecto 6

1.2.1 Objetivo general 6

1.2.2 Objetivos específicos..... 7

1.3 Preguntas de investigación 7

1.3.1 Pregunta principal 7

1.3.2 Preguntas de investigación 7

1.4 Línea de investigación a la que corresponde el problema..... 8

1.5 Palabra clave 8

1.6 Justificación e importancia..... 8

1.6.1 Justificación social 8

1.6.2 Justificación Ambiental 9

1.6.3 Justificación tecnológica 10

1.6.4 Justificación Económica..... 11

1.6.5 Justificación política / institucional..... 11

CAPÍTULO II 12

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS..... 13

2.1 Estado del arte 13

2.1.1 Antecedentes de la investigación 13

2.2 Bases teóricas de la investigación 20

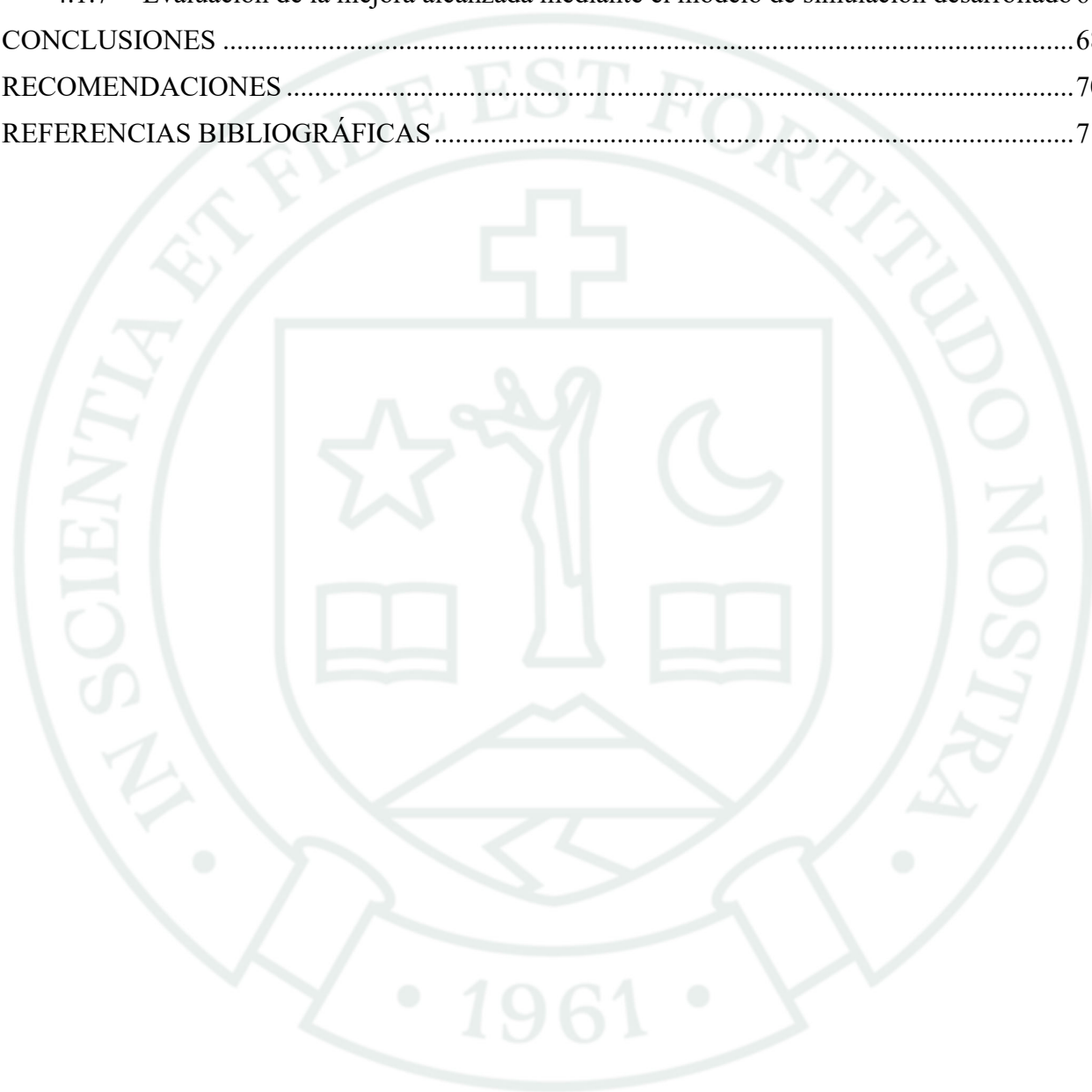
2.2.1 Proceso de Perforación Diamantina 20

2.2.2 Términos de perforación diamantina..... 21

2.2.3 Ingeniería de métodos 28

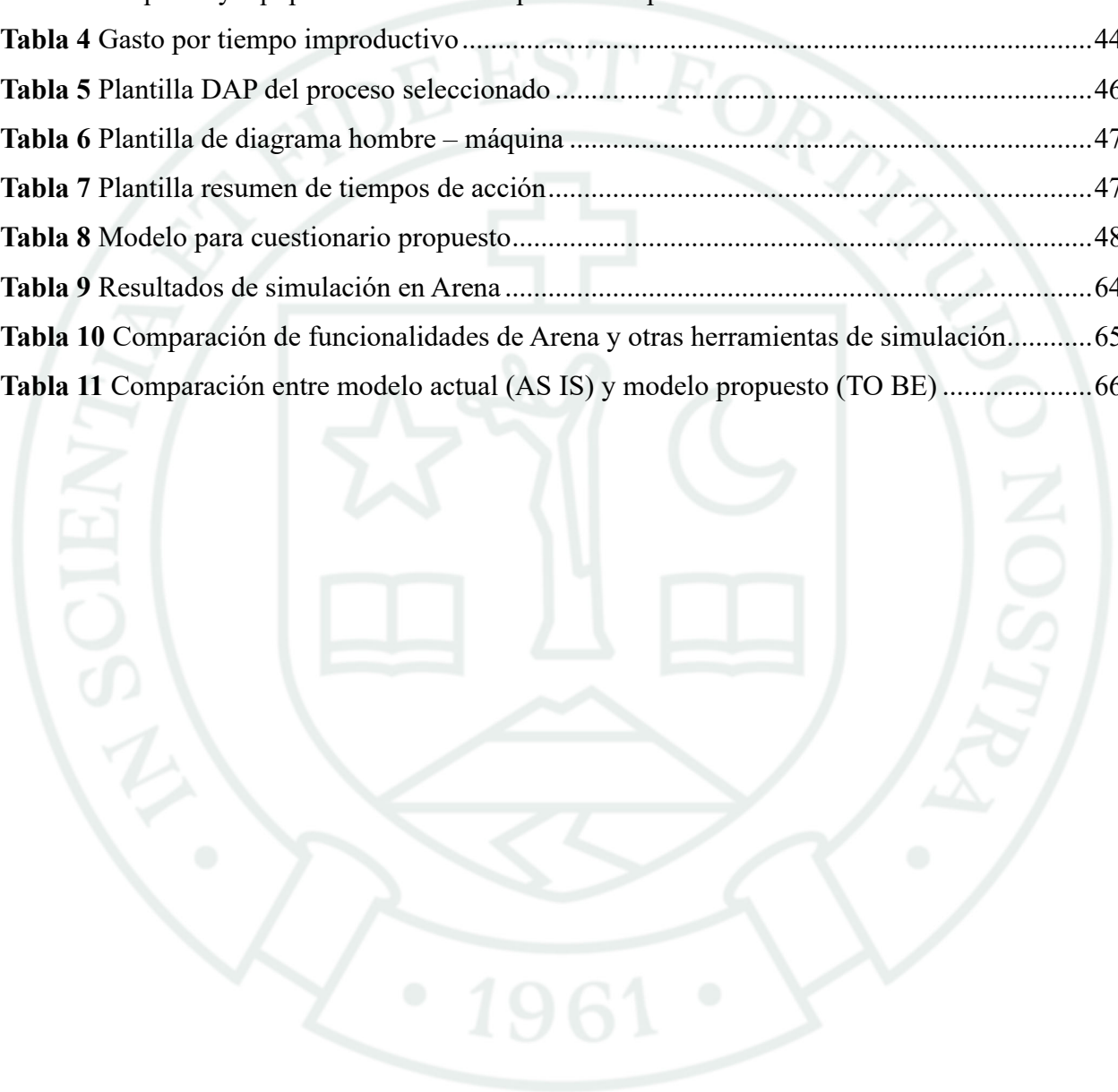
2.2.4	Estudio de Métodos.....	28
2.2.5	Medición del Trabajo	28
2.2.6	Marco legal.....	29
2.3	Hipótesis.....	30
2.3.1	Variable dependiente	31
2.3.2	Variable independiente	31
CAPÍTULO III		33
3.	ALCANCES Y LIMITACIONES.....	34
3.1	Alcances y limitaciones.....	34
3.2	Tipo y nivel de investigación	35
3.3	Población y muestra	37
3.3.1	Población.....	37
3.3.2	Muestra.....	37
3.4	Método, técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	38
3.4.1	Área de estudio.....	38
3.4.2	Limitaciones del proyecto	38
3.4.3	Materiales y equipos.....	38
3.4.4	Etapa 1. Recopilación de información del proceso de perforación diamantina	39
3.4.5	Descripción de actividades en la perforación diamantina.....	41
3.4.6	DAP del servicio de perforación diamantina	42
3.4.7	Brecha Técnica: Producción real y Producción proyectada en un año base	43
3.4.8	Costos por horas improductivas	44
3.4.9	Causas de ineficiencia en la ejecución de metros de perforación diamantina	45
3.4.10	Etapa 2. Modelo para optimizar tiempos en perforación diamantina	48
3.4.11	Establecimiento del método propuesto	49
3.4.12	Control de las mejoras propuestas en la actividad seleccionada.....	49
3.4.13	Etapa 3. Evaluación del modelo de optimización por simulación	50
CAPÍTULO IV.....		52
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	53
4.1	Análisis e interpretación de resultados.....	53
4.1.1	Recopilación de información de actividades en perforación diamantina.....	53
4.1.2	Comportamiento del avance operativo.....	55

4.1.3	Análisis de interrupciones	56
4.1.4	Análisis cualitativo de actividades frecuentes.....	57
4.1.5	Desarrollo de modelo en Arena para optimizar tiempos de perforación diamantina .	61
4.1.6	Comparación de funcionalidades de Arena con otras herramientas de simulación ...	65
4.1.7	Evaluación de la mejora alcanzada mediante el modelo de simulación desarrollado	66
CONCLUSIONES		68
RECOMENDACIONES		70
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		71



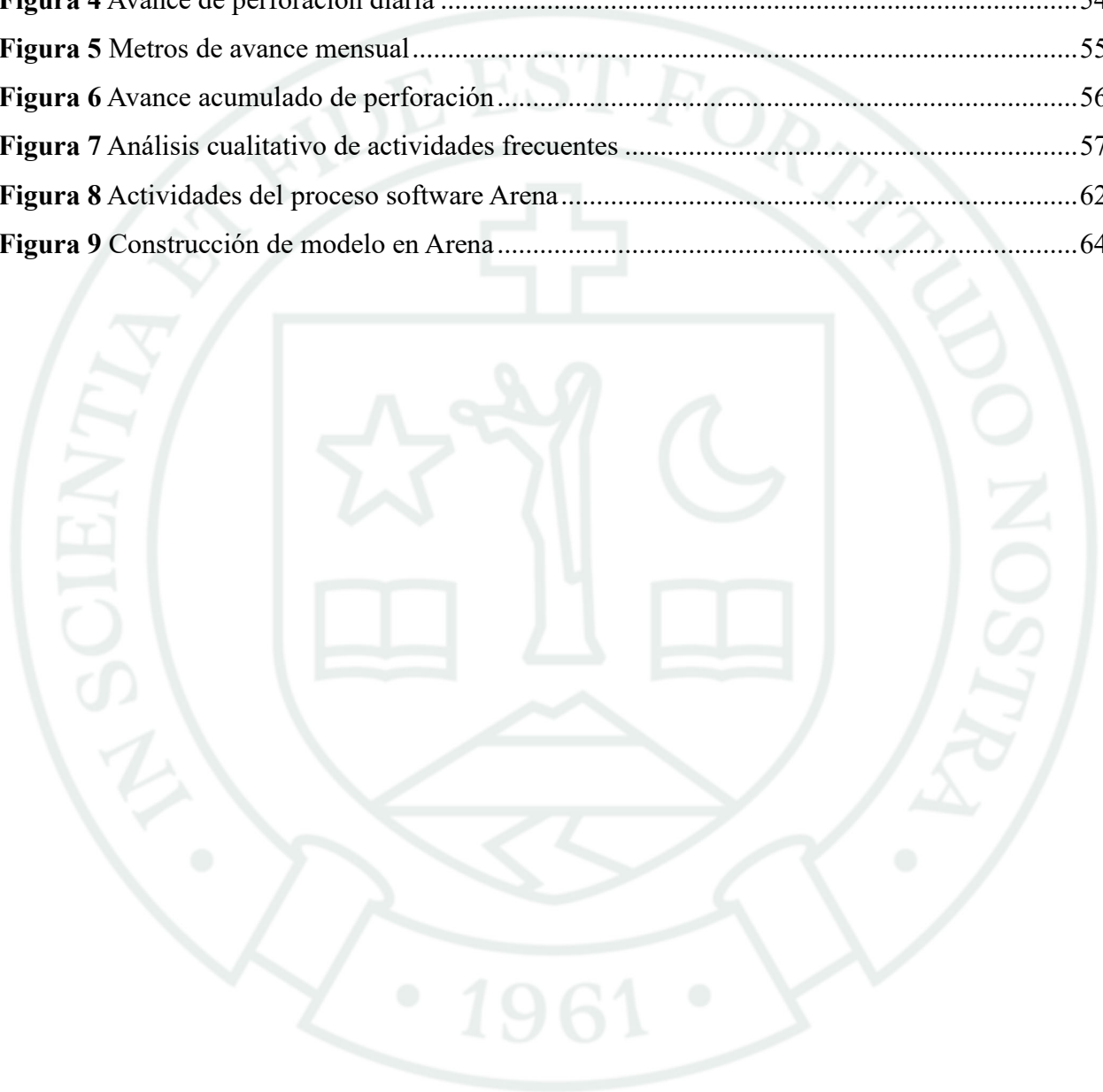
ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Operacionalización de variables	32
Tabla 2 Máquinas y equipos	40
Tabla 3 Máquinas y equipos utilizados en el proceso de perforación diamantina	43
Tabla 4 Gasto por tiempo improductivo	44
Tabla 5 Plantilla DAP del proceso seleccionado	46
Tabla 6 Plantilla de diagrama hombre – máquina	47
Tabla 7 Plantilla resumen de tiempos de acción.....	47
Tabla 8 Modelo para cuestionario propuesto.....	48
Tabla 9 Resultados de simulación en Arena	64
Tabla 10 Comparación de funcionalidades de Arena y otras herramientas de simulación.....	65
Tabla 11 Comparación entre modelo actual (AS IS) y modelo propuesto (TO BE)	66



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Organigrama de jerarquía de trabajo	40
Figura 2 Mapa de procesos de trabajo.....	41
Figura 3 Proceso de perforación diamantina.....	42
Figura 4 Avance de perforación diaria	54
Figura 5 Metros de avance mensual.....	55
Figura 6 Avance acumulado de perforación.....	56
Figura 7 Análisis cualitativo de actividades frecuentes	57
Figura 8 Actividades del proceso software Arena.....	62
Figura 9 Construcción de modelo en Arena.....	64



ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1 Data de perforación diamantina	76
Anexo 2 Equipo de perforación LFTM160 y cargador freedomtm	82
Anexo 3 Sandvik HL710 Hydraulic Rock Drill.....	88
Anexo 4 LM TM 90 Underground Coring Drill	90



INTRODUCCIÓN

La perforación diamantina constituye uno de los procesos más relevantes dentro de la exploración y evaluación de yacimientos minerales en la industria minera moderna. Su principal función es obtener testigos continuos del subsuelo, los cuales permiten realizar análisis geológicos, estructurales y geoquímicos imprescindibles para la toma de decisiones sobre la viabilidad técnica y económica de un yacimiento. No obstante, al tratarse de un proceso altamente especializado que involucra maquinaria sofisticada, personal capacitado y condiciones operativas variables, su eficiencia puede verse afectada por múltiples factores que incrementan los tiempos improductivos y elevan los costos operativos. En una unidad minera ubicada al sur del Perú, se han identificado diversas deficiencias en la ejecución de la perforación diamantina, evidenciadas en la incapacidad recurrente de alcanzar el avance programado de 20 metros por máquina y por turno, así como en pérdidas económicas aproximadas de 5 000 dólares por ciclo, atribuibles principalmente a tiempos de espera, fallas operativas y deficiencias de coordinación. Estas limitaciones dificultan el cumplimiento de los cronogramas de perforación, afectan la disponibilidad de información para la planificación minera y generan un impacto negativo tanto en la productividad como en la rentabilidad del proceso.

Las causas de estas ineficiencias están asociadas a factores diversos: mantenimiento no planificado de equipos, problemas técnicos recurrentes, gestión inadecuada de herramientas, falta de estandarización en la secuencia operativa y existencia de tiempos muertos generados por actividades no directamente relacionadas con la perforación. A ello se suman interrupciones atribuibles al cliente, como la falta de agua o energía, problemas de ventilación o retrasos en los programas de perforación. Bajo este contexto, se vuelve imprescindible desarrollar modelos de

mejora que permitan comprender, cuantificar y optimizar cada fase del proceso operativo, con el fin de reducir los tiempos improductivos y maximizar el rendimiento de los recursos.

La presente investigación aborda esta problemática a través de la integración de técnicas de ingeniería de métodos y simulación computacional mediante el software Arena. La ingeniería de métodos ofrece un conjunto de herramientas que permiten analizar detalladamente cada actividad del proceso, identificando movimientos innecesarios, secuencias operativas subóptimas y tiempos muertos que afectan el ciclo de perforación. Por su parte, Arena Simulation constituye una herramienta potente para modelar, representar y evaluar sistemas complejos basados en eventos discretos, permitiendo reproducir el comportamiento real del proceso de perforación diamantina, así como proyectar escenarios de mejora antes de su implementación en campo. Esta combinación metodológica no solo facilita la identificación de los cuellos de botella, sino que también permite evaluar el impacto cuantitativo de diversas alternativas de optimización.



CAPÍTULO I

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Determinación del problema

La perforación diamantina es un proceso esencial para la exploración y evaluación de yacimientos minerales, ya que permite la recuperación de muestras continuas del subsuelo (testigos) que son fundamentales para los análisis geológicos, estructurales y geoquímicos. En el contexto de una unidad minera ubicada al sur del Perú, se ha identificado que este proceso presenta deficiencias operativas persistentes, reflejadas en el incumplimiento del avance programado por turno (20 metros por máquina), prolongados tiempos de inactividad y una pérdida económica estimada en aproximadamente 5,000 dólares por ciclo (Boero, 2021; Becerra, 2021).

El origen de estas ineficiencias está asociado principalmente a factores como el mantenimiento no planificado de equipos, la descoordinación en la ejecución de actividades, la gestión deficiente de herramientas, la falta de control de tiempos operativos y la existencia de tiempos muertos o “stand by operativo”, relacionados directamente con el desempeño de los equipos y del personal operativo (Vergaray & Orihuela, 2022). Esta situación genera no solo un impacto económico negativo, sino también un retraso en la entrega de resultados geológicos clave, comprometiendo la planificación de corto y mediano plazo de las operaciones mineras.

Ante esta problemática, se propone una solución metodológica basada en la aplicación de técnicas de ingeniería de métodos y la simulación computacional mediante el software Arena. En primera instancia, se recopilarán datos reales del proceso de perforación diamantina, utilizando herramientas como matrices DAP, diagramas Hombre-Máquina y estudios de tiempos. Esto permitirá identificar con precisión las actividades que generan mayor ineficiencia y cuantificar los tiempos improductivos del proceso. Luego, con base en estos datos, se construirá un modelo de

simulación del estado actual del proceso (“AS IS”) en Arena, el cual reflejará con fidelidad la realidad operativa.

Posteriormente, se diseñará un modelo optimizado (“TO BE”), incorporando mejoras específicas tales como la reorganización de tareas, la reducción de tiempos ociosos, la estandarización de procedimientos y el mejor uso de los recursos humanos y técnicos. Este modelo simulado permitirá predecir con mayor precisión el impacto de las mejoras sobre indicadores clave como el tiempo estándar, el número de metros perforados por turno y el costo por ciclo.

Finalmente, se realizará un análisis comparativo entre ambos escenarios (AS IS y TO BE), evaluando los beneficios técnicos y económicos alcanzables. Para sustentar la viabilidad de la propuesta, se aplicarán herramientas de evaluación financiera como el Valor Actual Neto (VAN), la Tasa Interna de Retorno (TIR) y el análisis de costo-beneficio, con el fin de justificar la implementación del modelo desde una perspectiva integral (Jiménez, 2022; Salas Vásquez, 2016).

En ese sentido, esta investigación no solo se enfoca en describir el problema, sino en resolverlo a través de un modelo técnico, cuantificable y replicable, sustentado en metodologías probadas y herramientas digitales de simulación.

Según el boletín estadístico minero proporcionado por ESTAMIN (2023), en términos departamentales, el último trimestre del año 2023, La Libertad lideró el ranking con una contribución del 33.8%, seguida de cerca por Arequipa en segundo lugar, con el 21.6%. En tercer lugar, se situó

Cajamarca, con una contribución del 19.4%. La unidad minera bajo estudio, situada en el sur del Perú, se dedica a operaciones de tajo abierto para la extracción de minerales, logrando una producción diaria promedio de 400,000 toneladas. En este contexto, la perforación diamantina se

destaca como un proceso crítico. Actualmente, este proceso implica un costo de 30,000 dólares por ciclo, con una duración de 15 a 30 días. Se ha identificado un problema significativo relacionado con la ejecución ineficiente de metros en la perforación diamantina, con el stand by operativo como principal causa. La pérdida derivada de estos tiempos muertos asciende a 5,000 dólares por ciclo, debido a la falta de cumplimiento de los 20 metros por máquina y turno de avance programados. Esta gestión ineficaz, influenciada por mantenimiento de equipos, problemas técnicos, condiciones climáticas adversas o complicaciones geológicas imprevistas, representa un desafío relevante para las operaciones mineras. No solo afecta la productividad y eficiencia de la perforación, sino que también genera costos adicionales y retrasos en la obtención de muestras esenciales para evaluar yacimientos minerales, impactando así en la precisión de la información recolectada para la evaluación de los recursos minerales.

Por lo descrito líneas arriba la presente investigación propone la aplicación de ingeniería de métodos para analizar, diseñar y mejorar los métodos y procesos con la finalidad de mejorar significativamente los tiempos de perforación diamantina, tanto en términos de metros obtenidos como en la mejora del tiempo estándar, lo que resultará en un aumento de la eficiencia y la productividad de la mina.

1.2 Objetivo del proyecto

1.2.1 Objetivo general

Optimizar los tiempos de perforación diamantina a través del Software Arena en una unidad minera al sur del Perú, 2024.

1.2.2 *Objetivos específicos*

- Recopilar información sobre las actividades involucradas en el proceso de perforación diamantina.
- Desarrollar modelo basado en ingeniería de métodos utilizando el Software Arena en base a la información recopilada para la optimización de tiempos de perforación diamantina.
- Comparar las funcionalidades del software Arena con otras herramientas disponibles en el mercado minero, para justificar su selección como herramienta principal en la simulación y optimización del proceso de perforación diamantina.

1.3 Preguntas de investigación

1.3.1 *Pregunta principal*

¿De qué manera la implementación de un modelo de mejora basado en técnicas de ingeniería de métodos y simulado mediante el software Arena optimiza los tiempos de perforación diamantina en una unidad minera al sur del Perú?

1.3.2 *Preguntas de investigación*

- ¿Cómo influye la aplicación de un modelo de mejora basado en ingeniería de métodos en la optimización de tiempos de perforación diamantina?
- ¿Qué impacto tiene la simulación con el software Arena en la reducción de tiempos improductivos?
- ¿Cuál es la diferencia entre el modelo actual y el modelo propuesto en términos de productividad y costos?

1.4 Línea de investigación a la que corresponde el problema

Según las líneas de investigación de la Universidad Católica de Santa María para la Escuela Profesional de ingeniería de minas e indicando que se presentan según la Modalidad Presencial AUTO N° 019-VRINV-2019; la presente investigación corresponde a “Optimización de procesos mineros”, ya que, se busca optimizar el proceso de perforación diamantina con el software Arena lo cual permitirá un avance en el uso de nuevas herramientas de software minero.

1.5 Palabra clave

- Perforación diamantina.
- Simulación en software Arena.
- Optimización de tiempos.

1.6 Justificación e importancia

1.6.1 Justificación social

La perforación diamantina cumple un rol importante en la exploración y explotación minera, la cual garantiza la generación de empleo para miles de personas dentro del país, sin embargo, mejorar la técnica de los diferentes procesos que se llevan a cabo, incluyendo métodos multidisciplinarios es indispensable para optimizar el trabajo y mejorar los resultados. Actualmente, se han registrado ineficiencias dentro del proceso de perforación diamantina, lo que ha conducido a un retraso en las operaciones y, por ende, a la existencia de tiempos improductivos que afectan el trabajo de los colaboradores. Con el modelo de mejora propuesto se garantiza la reducción significativa de los tiempos no operativos, apoyando con el orden y sistematización de labores, lo cual no solo beneficiará a los colaboradores, quienes podrán trabajar de forma objetiva

y eficiente, sino que aumentará la producción y productividad de la empresa en su totalidad. (Montes Liñan y otros, 2021)

1.6.2 Justificación Ambiental

Las actividades mineras, como toda actividad antrópica, ejercen diversos impactos en el entorno, incidiendo en la atmósfera mediante la liberación de gases de efecto invernadero (GEI) y material particulado, así como contaminando diversos cuerpos de agua y suelos. Esto se debe al consumo y explotación de recursos, por lo que se infiere que a mayor tiempo de exposición, se generará un mayor impacto; de este modo, es necesario que la industria minera se esfuerce por cumplir con las normativas ambientales establecidas en las políticas nacionales e internacionales y que los resultados se reflejen en sus Estudios de Impacto Ambiental (Montes et al., 2022); no obstante, debido a la crisis climática actual, esto puede llegar a ser insuficiente, requiriendo de nuevos métodos que optimicen los procesos y demuestren un compromiso genuino con el ambiente.

En este contexto, el método planteado busca optimizar los procedimientos de perforación con el objetivo de lograr la reducción de los tiempos improductivos en los que las máquinas y equipos siguen emitiendo GEI's, de manera que el impacto negativo al ambiente se vea considerablemente reducido. Más aún, la ingeniería de métodos aplicada al proceso de perforación diamantina se presenta como una alternativa ideal, la cual permite llevar a cabo operaciones más controladas, aprovechando al máximo el espacio y tiempo. De esta manera, se podrán cubrir las necesidades de la industria minera, respetando el entorno de impacto y garantizando la preservación del mismo. (Montes Liñan y otros, 2021)

1.6.3 Justificación tecnológica

Según (Pees, 2004) durante muchos años se ha considerado a la Perforación como un trabajo artesanal o empírico en vez de una técnica especializada. La perforación diamantina ha sido fundamental para la exploración de recursos minerales en áreas remotas y ha experimentado avances significativos, como la introducción de la tecnología de los compactos de diamante policristalino (PDC). De acuerdo con Scott (2006), "a fines de la década de 1970, la empresa americana General Electric fue pionera en la tecnología de los compactos de diamante policristalino (PDC) como reemplazo de los diamantes naturales en brocas de perforación". La broca de diamante, con diamantes industriales incrustados en una matriz metálica, es esencial para este proceso, que ofrece una variedad de tamaños de diámetro para adaptarse a diferentes necesidades de perforación. La precisión y limpieza de los agujeros creados, junto con su capacidad de dirección vertical u horizontal, destacan su importancia como técnica no percusiva. El modelo software Arena busca capitalizar estas tecnologías y prácticas para mejorar la eficiencia y la rentabilidad de las operaciones mineras en la región.

Asimismo, la presente investigación incorpora un análisis comparativo entre el software Arena y otras herramientas de simulación utilizadas en el sector minero, tales como Simio, AnyLogic o herramientas especializadas como Vulcan o MineSched. Esta comparación permitirá sustentar la elección de Arena como la herramienta más adecuada para simular y optimizar procesos secuenciales, repetitivos y orientados a tiempos, como es el caso de la perforación diamantina. Su interfaz visual, flexibilidad en la programación de eventos discretos y capacidad de validación cuantitativa hacen de Arena una herramienta altamente efectiva para este tipo de procesos mineros.

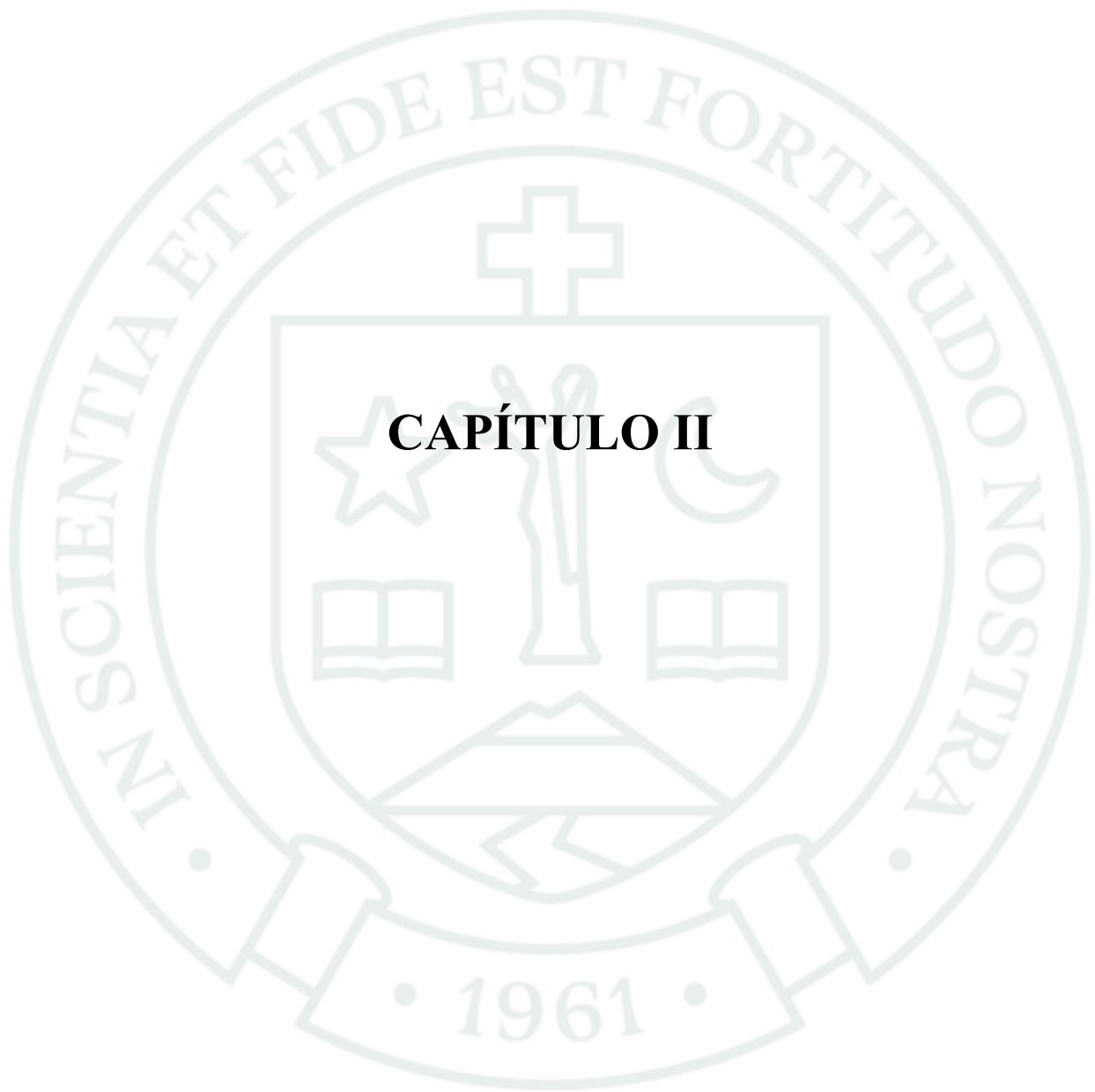
1.6.4 Justificación Económica

La optimización de los tiempos de perforación en la extracción de recursos minerales es crucial para maximizar la productividad y minimizar los gastos asociados. El modelo de mejora respaldado por tecnología avanzada como el software Arena, se espera reducir los tiempos de inactividad, mejorar la eficiencia de los equipos de perforación y aumentar la producción total de la unidad minera. Estos resultados se traducirán directamente en una mejora en la rentabilidad de la operación minera, al disminuir los costos operativos y aumentar los ingresos derivados de una mayor producción. Además, la optimización de los tiempos de perforación puede contribuir a la prolongación de la vida útil de la mina al permitir una extracción más rápida y eficiente de los recursos minerales disponibles. En resumen, este modelo de mejora no solo ofrece beneficios económicos inmediatos en términos de reducción de costos y aumento de ingresos, sino que también establece una base sólida para el crecimiento y la sostenibilidad a largo plazo de la operación minera en el sur del Perú.

1.6.5 Justificación política / institucional

Actualmente existen investigaciones que se enfocan en optimizar las operaciones en la industria minera, sin embargo, un bajo porcentaje de ellas se enfoca precisamente en optimizar los tiempos que comprende la etapa de perforación diamantina.

Es por esto, que el desarrollo de la presente investigación contribuirá con el sector académico e investigativo, aportando un antecedente para futuras investigaciones enfocadas en la optimización de procesos mediante la implementación de ingeniería de métodos.



2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 Estado del arte

2.1.1 *Antecedentes de la investigación*

En la investigación titulada “Propuesta de mejora para optimizar los tiempos de perforación efectiva con la finalidad de incrementar la productividad en una contrata de perforación diamantina de la Unidad Minera San Cristóbal aplicando ingeniería de métodos y TPM” tuvo como objetivo determinar lo que ocasiona los retrasos en la perforación diamantina y buscar alternativas de solución en las etapas de recuperación de muestra y mantenimiento tanto preventivo como correctivo, para ello se recopilaron datos teóricos para conocer las actividades que ejecuta la empresa en el área de perforación diamantina, así como las técnicas de Ingeniería de Métodos. Además, se contemplan casos de estudio en los que se utilizaron diferentes herramientas de la metodología utilizada en esta investigación para obtener una mejor comprensión de la técnica y una base para lo aplicable, concluyendo así que al aplicar técnicas de ingeniería de métodos se logra una mejora significativa en la gestión de tiempos , logrando reducir 12 minutos en el proceso de perforación diamantina, pues se logró un uso eficiente de la máquina perforadora reduciendo el tiempo improductivo de espera y aumentando el tiempo de perforación. (Vergaray Diestra & Orihuela Barriga, 2022)

El autor Salas Vasquez, (2016), en su trabajo de investigación utilizó la metodología DMAIC para mejorar la calidad del proceso de perforación en diamantina. Identificó las causas principales de la variabilidad en el proceso, destacando la instalación y el movimiento de herramienta como los subprocesos más críticos; además, propuso mejoras específicas para abordar estos inconvenientes, tales como la estandarización de las causas que inciden en el tiempo, la implementación de una rutina diaria de acondicionamiento de sonda, un control más riguroso del

cambio de corona y la confección de plataforma, entre otras. Estas mejoras fueron proyectadas y simuladas, mostrando un aumento teórico significativo en la producción. Por otro lado, se realizó un análisis de capacidad que demostró una reducción en la variabilidad del proceso y un aumento en el nivel sigma, indicando una mejora en la calidad del servicio. Los hallazgos alcanzados por este autor respaldan la conclusión de que la implementación de la metodología DMAIC puede tener un efecto positivo en la producción y la calidad del servicio en el proceso de perforación en diamantina.

Además, Correa Espinal et al., (2012), presentan un artículo el cual analiza la importancia de la ingeniería de métodos y tiempos en la gestión de la cadena de suministro (SCM). Cubre conceptos como Cadena de Suministro, SCM y Gestión Logística, enfatizando la integración de actividades para mejorar el desempeño y la ventaja competitiva en la Cadena de Suministro. La Ingeniería de Métodos y Tiempo se destaca como una herramienta crucial para mejorar la eficiencia en los procesos logísticos, aplicable tanto a la industria manufacturera como a la de servicios, contribuyendo al flujo fluido de materiales, productos e información, además de aportar factores de control y mejora. Esta herramienta ayuda a identificar áreas de mejora mediante la estandarización de procesos y parámetros predefinidos, lo que conduce a una mayor productividad. Dicha estandarización y optimización de las operaciones están ligadas a la productividad, haciendo de esta ingeniería un factor estratégico para alcanzar la productividad dentro de la Cadena de Suministro.

Por otro lado, Fierro Ahumada, et al., (2015) propusieron un sistema de perforación y sondaje para perforación diamantina o wire line, el cual incluye una torre, un cabezal de rotación, una prensa de barras, un sistema elevador de barras, un brazo manipulador de barras y un brazo de

cabeza de barra. El sistema automatizado permite transportar y posicionar las barras para la perforación, eliminando la intervención directa de los operarios, minimizando las posibilidades de accidentes, mejorando la productividad y reduciendo la cantidad de operarios involucrados. El sistema elevador de barras transporta y carga automáticamente las barras, y la plataforma de trabajo proporciona una superficie segura para los operarios. El brazo manipulador de barras coloca y retira las barras del pozo de perforación, y el brazo barra cabeza sostiene, flota, y retira o coloca la barra cabeza con la cabeza inyectora del eje de perforación. Este sistema reduce las horas hombre, disminuye los costos y evita las cargas suspendidas; además, mejora la seguridad, la eficiencia y la precisión en el proceso de perforación, ofreciendo una solución técnica avanzada que automatiza y simplifica el proceso de perforación, mejorando la seguridad, la eficiencia y la productividad en las operaciones de sondaje y perforación.

Rojas (2022) en su trabajo titulado ingeniería de Métodos para incrementar la productividad en las operaciones de la Empresa Nexa Resources El Porvenir S.A.C, Pasco, tuvo como objetivo el desarrollo de la ingeniería de métodos para incrementar la productividad aplicando un flujograma uniforme que estandariza el proceso de producción, así mismo se tomaron 5 etapas de la ingeniería las cuales fueron; seleccionar, registrar, examinar, evaluar y controlar, los análisis estadísticos se desarrollaron mediante pruebas de normalidad con Shapiro Wilk - Kolgomorov smirnov utilizando el software SPSS, así como con Wilcoxon, obteniendo un incremento favorable de la productividad en las operaciones a través del conocimiento del ciclo de perforación en la mina, elaboración del estatus de mantenimiento preventivo y ejecución, así como el control de las respuestas de la implementación, este incremento en la productividad llegó a un 25.60%, las mejoras en cuanto al tiempo con el control de actividades no productivas como los retrasos, y la

creación de un programa con plazos específicos para cada actividad, estableciendo límites temporales, contribuyen a aumentar la eficiencia en un 30.97%, concluyendo que con el propósito de optimizar los recursos, uniformizar el proceso de mantenimiento preventivo a través de un plan para el equipo, orientado a garantizar su rendimiento máximo y prevenir fallas, se logra aumentar la eficiencia en un 27.82%, asegurando un mínimo de 5.91 horas efectivas y evitando demoras operativas.

Silapú (2022), en su trabajo titulado Optimización de tiempos operacionales en la perforación, voladura y acarreo. Unidad minera capacho de oro I - Minera Vicus SAC - Barranca - Lima, tuvo como objetivo optimizar la gestión de tiempos y aumentar la productividad, con un bajo costo, y para ello se utilizaron tres métodos de explotación que consisten en método de corte con relleno ascendente, método por chimeneas – cercado y el método por chimeneas que es el más recomendado y crítico, el mineral se extrae mediante perforación y voladura con equipos de perforación, por otro lado el explosivo utilizado es la dinamita, el transporte y el acarreo implica el uso de piques, inclinados, cruceros, galerías y chimeneas, esto resulta en la identificación de actividades y tiempo que se utilizará, así como cómo recuperar y optimizar estos tiempos y controlar el tiempo de las actividades que no se moverán, por consiguiente, logrando concluir con recomendaciones técnicas para optimizar el proceso de perforación y voladura.

Becerra (2021), en su proyecto titulado “Gestión de la perforación diamantina a través de metodologías ágiles (Scrum – Kanban)”, tuvo como objetivo dar a conocer las ventajas de utilizar las técnicas de gestión ágiles Kanban y Scrum en el proceso de perforación diamantina, para ello se aplicaron las metodologías de gestión ágil Scrum y Kanban, obteniendo resultados que contraponen las metodologías tradicionales y las metodologías ágiles, determinando que las

metodologías ágiles son las más eficientes y óptimas, ya que impulsan la consecución de oportunidades de mejora en la exploración. La investigación concluye con que la utilización de herramientas de gestión de proyectos, por sí solas no garantizan el éxito u optimización de procesos, por lo que se debe incentivar el compromiso tanto de los trabajadores como de la alta dirección.

Jiménez (2022), en su trabajo titulado Análisis y propuesta de mejora de la calidad de perforación a diamantina utilizando el proceso seis sigma aplicando las etapas DMAIC (definir, medir, analizar, mejorar y controlar), Zamora realizado en Ecuador 2022, tuvo como objetivo mejorar la calidad de perforación diamantina mediante la implementación de seis sigma aplicando las etapas DMAIC para ello se realizó el diagnóstico situacional del departamento de exploración de la minera Lundin Gold, posterior a ello se analizaron los aspectos internos y externos que no permiten realizar óptimamente los procesos de perforación, obteniendo como resultado modelos de procesos para la operación, desde un organigrama específico para el departamento de exploración, planteamientos técnicos programados, a nivel productivo, todo ello enfocado en indicadores operativos para la perforación con los controles correspondientes, El modelo de la propuesta de mejora tuvo una duración proyectada de cuatro trimestres y un costo estimado de 3,160,000 dólares, para toda temporada, concluyendo que medir exhaustivamente todos los procedimientos asociados con la perforación a diamantina y los indicadores obtenidos serán fundamentales para identificar oportunidades de mejora, guiando la implementación de cambios significativos en los procesos.

Rivas & Ugarte (2019), en su trabajo titulado “Optimización de tiempos operacionales en la perforación, voladura y acarreo de la minera La Florida”, el cual tuvo como objetivo utilizar la metodología Six Sigma y mantener los estándares de la Compañía para optimizar el proceso productivo de Yamana Gold Minera Florida y reducir el costo de fortificación, para esto como

mismamente se dice, se utilizará la metodología de Six Sigma para reducir variaciones, se logró ver las variaciones existentes durante el modelo de mejora del método y se detectó la falta de agua y aire, fiscalización ITO/ falta de equipos, problemas de mantención/ durabilidad de los equipos, falta de medición, mala gestión de la compra de materiales y la mala disciplina operacional, además por esto la investigación concluye con que, a través del uso de la metodología Six Sigma, se pueden identificar problemas más comunes como los problemas de comunicación, cambios culturales, falta de personal y mantenimiento de equipos en un período de tiempo determinado.

Salazar (2019), en su trabajo titulado como “Optimización del proceso de perforación y voladura subterránea para la Sociedad Minera Oro Sol Uno”, tuvo la finalidad de optimizar el proceso de perforación y voladura subterránea para la Sociedad Minera Oro Sol Uno, aplicando la malla de perforación y la voladura luego de haber realizado una limpieza y saneamiento en la zona establecida para la perforación, por consiguiente se tomó medidas y se procedió a establecer parámetros de la perforación y la voladura que fueron comparados con la distribución de barrenos del diseño del momento y el diseño que se realizó recientemente, concluyendo que la investigación y el trabajo de campo han demostrado que la nueva propuesta tiene buenos resultados, por lo que la empresa minera debe ejecutar el modelo propuesto el nuevo diseño propuesto.

Salas (2016) en su trabajo titulado “Análisis y mejora de la calidad en el proceso de perforación en diamantina utilizando la metodología DMAIC” tuvo como objetivo optimizar la calidad del proceso de perforación diamantina interior mina, para ello se utilizó la metodología DMAIC, que consiste en definir, medir, analizar, implementar y controlar), para ello se identificó el principal problema: poca producción a causa del incumplimiento con los tiempos de entrega; en la etapa de medición, se analizaron los factores de tiempo y de producción y se determinó que el movimiento de herramienta y la instalación exceden sus tiempos teóricos de ejecución;

seguidamente, luego de realizar un análisis se descubrieron los factores fundamentales que causaron la variabilidad en los subprocesos que se identificaron en una fase previa, además, en la proyección, se logró la elaboración de propuestas de mejora que contemplan la causa raíz identificada inicialmente, para poder optimizar el proceso de perforación. Así mismo, el análisis de capacidad se realizó mediante el control estadístico de datos. Se utilizó el software Minitab 17 para medir los índices de capacidad, donde se proyectan mejoras para aumentar la variabilidad a 2,65, lo que indica un proceso más concentrado, concluyendo así que sería viable realizar un seguimiento de las propuestas elaboradas, y crear los registros y listas de seguimiento correspondientes.

Portilla et al. (2012) en su trabajo titulado “Metodología para la optimización de parámetros de perforación a partir de propiedades geomecánicas tuvo como objetivo reducir los tiempos y costos de operación, y para ello fue necesario evaluar los parámetros que se utilizan en la perforación de pozos, así como desarrollar programas de mejora y procesos de desempeño eficientes. Este trabajo presenta una metodología sencilla y práctica para evaluar la relación entre las propiedades geomecánicas y la energía proporcionada al perforar un pozo, para establecer los parámetros óptimos para mejorar la eficiencia del sistema de perforación y por ende la tasa de penetración, donde nos dará como resultado la eficiencia del sistema en su aspecto mecánico y finalmente, se concluye que, al utilizar datos de operación, se pueden determinar las áreas más importantes o críticas para incidir con la optimización en los parámetros de perforación de pozos cercanos

2.2 Bases teóricas de la investigación

2.2.1 *Proceso de Perforación Diamantina*

La perforación diamantina utiliza una broca diamantada ya que es un material con una elevada dureza y conductividad, que la convierte en un material efectivo para realizar el corte de roca y extraer un testigo de la roca, el cual es registrado y guardado en el almacén de testigos para protegerlo utilizando para ello cajas porta testigos. (Mojonero Aguilar, 2023)

El proceso de descubrimiento de un yacimiento mineral comienza con la exploración o reconocimiento, que consiste en la observación del terreno y la recolección de muestras para la búsqueda de minerales. A continuación, se lleva a cabo la prospección, que utiliza herramientas y técnicas más complejas, como equipos pequeños para recolectar muestras. Estos trabajos iniciales no afectan el medio ambiente. Debido a esto, no es necesario obtener la aprobación o aprobación del Estado para llevarlo a cabo, sin embargo, es importante respetar los derechos de la comunidad y evitar interferencias en sus actividades. (Vergaray Diestra & Orihuela Barriga, 2022)

La perforación diamantina se utiliza para realizar investigaciones mineras y geológicas, ya que este proceso es esencial para la exploración porque permite obtener muestras o testigos cortados del yacimiento minero. (Vigo Llanos, 2016)

Existen dos formas de realizar la perforación de diamantina, uno de ellos es tradicional, utilizando brocas de sección anular, de procesos medios de aleación de acero con diamantes en una matriz de carburo de tungsteno, mientras que el otro es el "hecho a cable o wireline" (Vergaray Diestra & Orihuela Barriga, 2022)

La perforación diamantina, la podemos resumir en 3 etapas, pre-perforación, perforación y post perforación, estos 3 unidos dan como resultado a 16 complementos:

- Pre – Perforación
 - La recibida, el traslado e instalación de la plataforma.
 - Launch.
 - Configuración de la herramienta.
 - Comprensión de fluidos.
- Perforación
 - Comenzando la perforación.
 - Cortar un estrato.
 - Testigo y extracción de tubo.
 - Movilidad de las herramientas.
- Post – Perforación
 - Encajado para la muestra.
 - Análisis de la trayectoria.
 - Definición de sondaje.
 - Entrega tanto de la plataforma como del producto final.

2.2.2 Términos de perforación diamantina

Testigo de perforación diamantina

La perforación diamantina es un método de exploración geológica que utiliza brocas impregnadas con diamantes industriales para penetrar formaciones rocosas de diversa dureza. Este

procedimiento permite la obtención de muestras cilíndricas continuas denominadas *testigos*, los cuales conservan la estructura, textura y características originales del macizo rocoso.

Los testigos son extraídos cuidadosamente, etiquetados y registrados en función de su profundidad y orientación. Posteriormente, se almacenan en cajas porta-testigos y son trasladados a instalaciones especializadas denominadas *Coreshack*, donde se conservan para su análisis geológico, geotécnico y geomecánicos. La calidad y continuidad del testigo son fundamentales para la confiabilidad de los estudios posteriores, como la determinación de propiedades físicas y mecánicas de la roca.

Logueo geotécnico

El logueo geotécnico es el proceso sistemático de descripción, medición y registro de las propiedades geomecánicas del macizo rocoso a partir de testigos de perforación. Este análisis incluye parámetros como la calidad de la roca (RQD), la frecuencia y características de las discontinuidades, el grado de alteración, la presencia de agua y la resistencia de la roca intacta.

Este tipo de logueo puede realizarse en etapas tempranas de exploración geológica o en fases avanzadas mediante perforaciones orientadas, lo que permite obtener información más precisa sobre la orientación de las estructuras. Los datos obtenidos son esenciales para el diseño de excavaciones, estabilidad de taludes, túneles y cimentaciones.

Logueo geológico

El logueo geológico consiste en la descripción detallada de los testigos de perforación con el objetivo de identificar las características geológicas del subsuelo. Esta actividad incluye la determinación de litologías, identificación de contactos geológicos, zonas de mineralización, alteraciones hidrotermales, estructuras geológicas y otras características relevantes.

El registro geológico permite reconstruir la evolución geológica del área de estudio, así como evaluar su potencial económico en proyectos mineros. Además, constituye una herramienta fundamental para correlacionar unidades geológicas entre diferentes sondajes.

Mapeo geológico-geotécnico

El mapeo geológico-geotécnico es una actividad de campo que implica la observación, medición y registro de parámetros geológicos y geotécnicos directamente en afloramientos, taludes o excavaciones. Este proceso permite caracterizar el macizo rocoso y los suelos, considerando factores como tipo de roca, estructuras geológicas, grado de fracturamiento, condiciones de alteración y presencia de agua.

La información obtenida es fundamental para la clasificación geomecánica del terreno y para la toma de decisiones en el diseño, planificación y ejecución de obras de ingeniería civil y minera.

Masa rocosa

La masa rocosa se define como el conjunto de rocas que conforman el subsuelo, caracterizado por la presencia de discontinuidades tales como fallas, diaclasas, fracturas y pliegues. Estas discontinuidades determinan el comportamiento mecánico del macizo, haciéndolo generalmente discontinuo, heterogéneo y anisotrópico.

El estudio de la masa rocosa es esencial para evaluar su resistencia, deformabilidad y estabilidad frente a esfuerzos inducidos por actividades humanas o procesos naturales.

Roca intacta

La roca intacta corresponde al material rocoso libre de discontinuidades visibles, que conserva sus propiedades originales. Este tipo de roca es utilizado principalmente para ensayos de laboratorio, donde se determinan parámetros como resistencia a la compresión, tracción y módulo de elasticidad.

Los fragmentos de testigos diamantinos sin fracturas representan ejemplos típicos de roca intacta.

Discontinuidades

Las discontinuidades son superficies de debilidad dentro de la masa rocosa que pueden originarse por procesos tectónicos, sedimentarios o mecánicos. Estas presentan una resistencia a la tracción nula o muy baja, lo que influye significativamente en la estabilidad del macizo rocoso.

Entre las principales discontinuidades se encuentran las diaclasas, fallas, planos de estratificación y foliaciones, las cuales condicionan el comportamiento estructural del terreno.

Diaclasas (juntas)

Las diaclasas son fracturas en la roca en las que no se ha producido desplazamiento relativo entre los bloques. Son las estructuras más comunes en los macizos rocosos y tienen gran importancia en el análisis geotécnico.

Pueden presentarse abiertas, rellenas de materiales secundarios o completamente cerradas. Su orientación, espaciamiento y continuidad influyen en la resistencia, permeabilidad y estabilidad del macizo rocoso.

Fallas

Las fallas son fracturas en las que se ha producido desplazamiento de los bloques rocosos a lo largo de un plano de ruptura. Estas estructuras pueden variar en escala desde pequeñas fallas locales hasta grandes sistemas regionales.

Las fallas representan zonas de debilidad significativa y pueden afectar la estabilidad de taludes, túneles y otras obras de ingeniería, además de controlar la circulación de fluidos en el subsuelo.

Factor de seguridad

El factor de seguridad (F) es un parámetro utilizado en ingeniería geotécnica para evaluar la estabilidad de un sistema. Se define como la relación entre las fuerzas resistentes del terreno y las fuerzas que tienden a generar su falla.

- Si $F > 1$, el sistema es estable.
- Si $F < 1$, el sistema es inestable.
- Si $F = 1$, el sistema se encuentra en equilibrio límite o condición de falla.

Este parámetro es fundamental en el diseño de taludes, excavaciones y estructuras de soporte.

Terraplén

El terraplén es una estructura construida mediante la acumulación de material suelto o no consolidado con el objetivo de elevar el nivel del terreno. Se utiliza comúnmente en la construcción de carreteras y plataformas.

En comparación con los desmontes (excavaciones en terreno natural), los terraplenes presentan pendientes más suaves, generalmente alrededor de 3:1, lo que contribuye a su estabilidad.

Clasificación RMR (Rock Mass Rating)

El sistema RMR, desarrollado por Bieniawski, es una clasificación geomecánica ampliamente utilizada para evaluar la calidad del macizo rocoso. Este sistema considera parámetros como:

- Resistencia de la roca intacta
- RQD (Rock Quality Designation)
- Espaciamiento y condición de discontinuidades
- Presencia de agua
- Orientación de discontinuidades

El valor RMR permite clasificar el macizo rocoso y definir criterios de diseño para obras de ingeniería.

Índice Q de Barton

El sistema Q de Barton es una clasificación geomecánica que evalúa la calidad del macizo rocoso mediante un índice que varía entre 0.001 y 1000. Este índice considera factores como la rugosidad y alteración de las discontinuidades, el número de familias de fracturas y la presión de agua.

Es especialmente útil en el diseño de sostenimiento en excavaciones subterráneas, como túneles y galerías.

Índice GSI (Geological Strength Index)

El índice GSI es un sistema de clasificación que permite estimar las propiedades mecánicas del macizo rocoso a partir de la observación visual de su estructura y el estado de sus discontinuidades.

Este método es ampliamente utilizado para determinar parámetros de resistencia y deformabilidad en modelos geomecánicos.

Litologías

La litología describe las características físicas y mineralógicas de una roca, tales como color, textura, tamaño de grano, composición y estructura. Esta información puede obtenerse mediante la observación directa de afloramientos, muestras de mano o testigos de perforación.

El análisis litológico es fundamental para la identificación de unidades geológicas y la interpretación del ambiente de formación de las rocas.

Geología estructural

La geología estructural es la rama de la geología que estudia la disposición, geometría y deformación de las rocas, así como los procesos tectónicos responsables de su formación. Incluye el análisis de estructuras como pliegues, fallas y fracturas.

Su estudio permite comprender la evolución geológica de una región, así como evaluar la influencia de las estructuras en la estabilidad del terreno y en la distribución de recursos minerales.

2.2.3 Ingeniería de métodos

La Ingeniería de Métodos de manera analítica se define como la técnica que permite que una actividad perteneciente a una tarea específica sea analizada de forma detallada con el fin de eliminar todas las actividades innecesarias y, en caso de ser necesarias, encontrar la mejor actividad y buscar la forma más rápida de ejecutarla. (Vergaray Diestra & Orihuela Barriga, 2022)

Podemos definirla de manera sintética como el método que garantiza un aprovechamiento eficiente de los recursos humanos y materiales para completar una tarea específica.

2.2.4 Estudio de Métodos

El estudio de métodos está relacionado con la optimización del trabajo y se relaciona con la determinación de tiempos no productivos y, por lo tanto, establecer pautas de tiempo para la mejora de la operación.

2.2.5 Medición del Trabajo

La medición del trabajo consiste en la aplicación de métodos para calcular la cantidad de tiempo que se requiere para que un trabajador calificado complete una tarea específica siguiendo un estándar de ejecución determinado. Así, la medición del trabajo se considera una estrategia muy beneficiosa para disminuir la cantidad de trabajo, especialmente al eliminar los movimientos innecesarios y los tiempos ineficientes.

La medición del trabajo busca la identificación de tiempos no productivos y, por lo tanto, establecer normas de tiempo para realizar mejor las operaciones.

2.2.6 Marco legal

Constitución política del Perú

La Constitución política del Perú en su Artículo 7° indica que “Todos tienen derecho a la protección de su salud, la del medio familiar y la de la comunidad, así como el deber de contribuir a su promoción y defensa.” (Congreso de la República, 1993, art. 7), sienta las bases para la protección de la salud en todas las situaciones, incluido el trabajo

D.S. N.º 014-92-EM - Minería, Ley General de Minería Ed. 2023

La Ley General de Minería abarca todos los aspectos relacionados en la explotación de los recursos minerales presentes en el suelo y subsuelo del país, así como en la zona marítima bajo jurisdicción nacional. Sin embargo, esto no se aplica a la extracción de petróleo, hidrocarburos similares a esta, depósitos de guano, fuentes de energía geotérmica ni a las aguas termales. (MINEM, 2023)

D.S. N° 024-2016-EM modificado por D.S. N° 023-2017-EM, Reglamento de Seguridad y Salud Ocupacional en Minería. Ed. 2020

El propósito principal de este reglamento es evitar la aparición de eventos adversos, incidentes peligrosos, accidentes laborales y condiciones de salud ocupacional, al mismo tiempo que fomenta prácticas orientadas a prevenir riesgos laborales en la industria minera. En este sentido, involucra a los trabajadores, empleadores y las autoridades gubernamentales para garantizar la promoción, difusión y aplicación de las medidas establecidas en este reglamento. (MINEM, 2023)

D.S. N° 020-2020-EM, Reglamento de Procedimientos Mineros - Ed. 2023

Este reglamento tiene un alcance nacional y su cumplimiento es obligatorio, tiene por objeto establecer y regular los procedimientos relacionados con la minería contempladas en la Ley General de Minería, se aplica a todas las personas, ya sean naturales o jurídicas, tanto de derecho público como privado, que estén llevando a cabo trámites mineros ante el Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, la Dirección General de Minería o los Gobiernos Regionales.

2.3 Hipótesis

La aplicación de un modelo de mejora basado en técnicas de ingeniería de métodos, sustentado en datos reales del proceso de perforación diamantina y simulado mediante el software Arena, permitirá optimizar significativamente los tiempos operativos, reducir los tiempos improductivos y aumentar la productividad y rentabilidad de la operación minera. Además, se demostrará que Arena es una herramienta más eficiente que otras disponibles en el mercado, al ofrecer una simulación precisa, flexible y aplicable a escenarios mineros complejos.

La implementación de un modelo de mejora basado en ingeniería de métodos y simulado en Arena optimiza significativamente los tiempos de perforación diamantina, reduciendo tiempos improductivos y aumentando la productividad.

Hipótesis específicas

- La reorganización de actividades mediante ingeniería de métodos disminuye los tiempos muertos en el proceso de perforación.
- El uso del software Arena permite simular escenarios que mejoran la eficiencia operativa frente al modelo actual.

- La aplicación del modelo propuesto genera beneficios económicos medibles en la operación minera.

2.3.1 Variable dependiente

- Tiempo de perforación diamantina.

2.3.2 Variable independiente

- Modelo de mejora basado en ingeniería de métodos y simulación Arena.

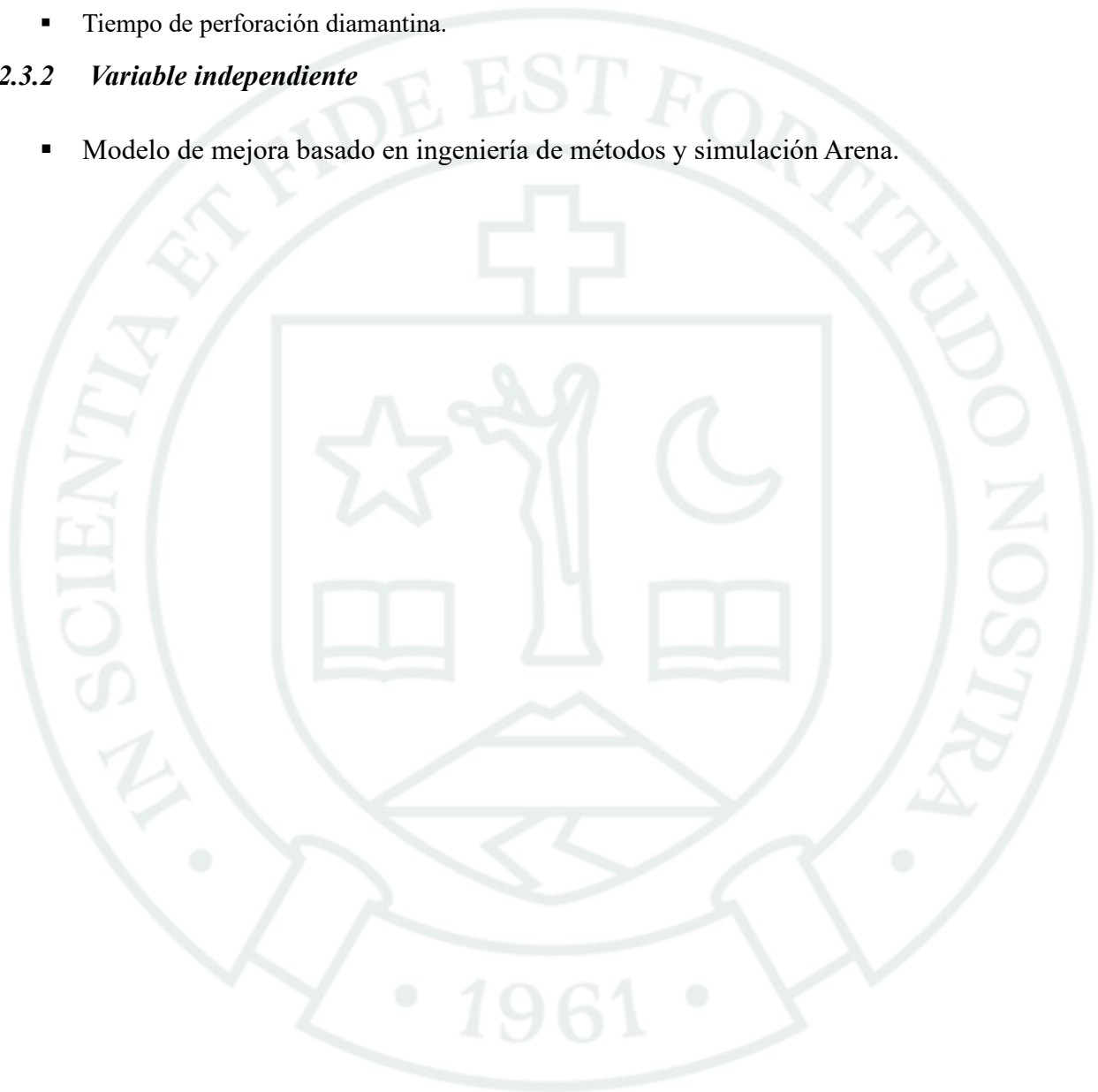


Tabla 1*Operacionalización de variables*

Variable	Definición conceptual	Definición operacional	Indicadores	Escala / Unidad
Variable Dependiente: Tiempo de perforación diamantina	Duración total del ciclo que incluye tiempos productivos e improductivos del proceso de perforación.	Minutos/horas registradas por turno en reportes operativos.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Tiempo estándar ▪ Tiempo improductivo ▪ Metros perforados/turno 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Numérica (minutos / horas / metros)
Variable Independiente: Modelo de mejora basado en ingeniería de métodos y simulación Arena	Conjunto de técnicas de análisis, rediseño y optimización del proceso aplicadas y validadas mediante simulación.	Aplicación del modelo TO BE en Arena y comparación con AS IS.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Reducción de tiempos muertos ▪ Incremento de metros perforados ▪ Reducción de costos por ciclo ▪ Mayor disponibilidad del taladro 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Numérica (horas, %, metros, costo)

Nota: Tipo de variables aplicado con él en perforación diamantina con el software Arena.



CAPÍTULO III

3. ALCANCES Y LIMITACIONES

3.1 Alcances y limitaciones

La presente investigación tiene como alcance el análisis detallado del proceso de perforación diamantina en una unidad minera ubicada al sur del Perú, abarcando la identificación de actividades productivas e improductivas, el estudio de tiempos operativos y la evaluación del desempeño de equipos y personal involucrado. El estudio se desarrolla dentro del marco de la ingeniería de métodos, utilizando herramientas como el diagrama de análisis de procesos (DAP), el diagrama hombre máquina, la técnica de interrogación y el estudio de tiempos, lo que permite comprender el comportamiento real del sistema y proponer mejoras orientadas a incrementar la eficiencia. Asimismo, la investigación incluye el desarrollo de un modelo de simulación en Arena que reproduce fielmente el estado actual (AS IS) y permite implementar un escenario optimizado (TO BE) basado en la reorganización y estandarización de actividades. Finalmente, el alcance contempla una evaluación económica, mediante indicadores como el VAN, TIR y Relación Costo–Beneficio, que sustenta la viabilidad financiera de las mejoras propuestas. Todo el análisis se realizó sobre la base de 660 reportes operativos recopilados durante 30 días continuos de operación.

Sin embargo, la investigación presenta ciertas limitaciones. En primer lugar, debido a políticas internas de confidencialidad, no fue posible incluir información específica sobre el nombre y ubicación exacta de la unidad minera ni detalles sensibles del entorno operativo, lo que restringe la descripción completa del contexto. Asimismo, el estudio depende íntegramente de la calidad de los registros operativos proporcionados por la empresa; cualquier inconsistencia o falta de detalle en esos registros puede afectar la exactitud del análisis y la simulación. Otra limitación importante es que no se ejecutaron pruebas piloto en campo, ya que por razones operativas y de

seguridad la validación del modelo TO BE se realizó únicamente mediante simulación computacional. Además, el estudio no incorpora variaciones geológicas complejas, como dureza irregular de la roca o condiciones hidrogeológicas, debido a que su modelamiento requiere equipos y ensayos especializados fuera del alcance de esta investigación. De igual manera, la propuesta asume la disponibilidad constante de personal y recursos técnicos, lo cual en la práctica puede verse afectado por contingencias operativas. Finalmente, el análisis se limita exclusivamente al proceso de perforación diamantina y no comprende procesos complementarios como geología, voladura, mantenimiento externo ni logística de transporte de muestras.

3.2 Tipo y nivel de investigación

La presente investigación es de tipo aplicada, ya que se orienta a resolver un problema concreto dentro de una operación minera real. Utiliza un enfoque cuantitativo, al apoyarse en la recopilación de datos medibles y en la simulación de escenarios. El nivel de investigación es descriptivo-explicativo: descriptivo porque se detalla el comportamiento actual del proceso de perforación, y explicativo porque se analiza cómo las variables de tiempo y eficiencia se ven afectadas por la implementación del modelo de mejora.

La población de estudio está conformada por todos los elementos involucrados en el proceso de perforación diamantina de la unidad minera en análisis, incluyendo equipos, operarios, actividades y tiempos de operación. La muestra considera específicamente 11 máquinas perforadoras, 22 equipos auxiliares, 162 trabajadores operativos y supervisores, y 17 actividades relevantes del proceso.

La investigación se desarrolla en tres etapas principales:

En la primera etapa, se recopila información del proceso actual a través de observación directa y análisis documental. Se aplican herramientas de ingeniería de métodos como el diagrama de análisis del proceso (DAP), el diagrama hombre- máquina y el estudio de tiempos, con el objetivo de identificar y cuantificar los tiempos improductivos dentro del proceso de perforación diamantina. Esta etapa permite reconocer las causas principales de la baja productividad y establecer una línea base (estado actual del sistema).

En la segunda etapa, se implementa el modelo de simulación del proceso actual (AS IS) en el software Arena. Este modelo digital reproduce el flujo real de actividades, tiempos de espera, uso de maquinaria y asignación de recursos. Con base en el análisis del modelo, se diseñan mejoras orientadas a la reducción de los tiempos improductivos. Estas mejoras incluyen la reorganización de secuencias operativas, la eliminación de tareas innecesarias y la reasignación de responsabilidades. Posteriormente, se construye un nuevo modelo simulado (TO BE) que incorpora estas mejoras, permitiendo comparar su desempeño con el modelo original. Adicionalmente, se realizará una revisión comparativa entre el software Arena y otras plataformas disponibles en el mercado para simular procesos industriales. Se considerarán criterios como facilidad de uso, aplicabilidad en minería, capacidad de modelado de procesos cíclicos, disponibilidad de recursos técnicos, soporte y costo. Esta comparación permitirá validar técnicamente la elección de Arena y justificar su uso como herramienta principal en esta investigación.

En la tercera etapa, se evalúa el impacto de las mejoras propuestas mediante el análisis comparativo de indicadores de productividad, eficiencia y rendimiento económico. Se mide la cantidad de metros perforados por turno, la reducción de tiempo estándar y la mejora en el uso de

recursos. Asimismo, se realiza un análisis financiero mediante indicadores como el Valor Actual Neto (VAN), la Tasa Interna de Retorno (TIR) y la relación Costo/Beneficio, con el fin de demostrar la viabilidad económica del modelo de mejora. Esta etapa final permite validar si la propuesta genera un impacto técnico y económico significativo y si puede ser replicada o escalada dentro de la operación minera.

3.3 Población y muestra

3.3.1 Población

La población objeto de estudio de la presente investigación está constituida por todos los elementos involucrados en el proceso de perforación diamantina en una unidad minera ubicada al sur del Perú. Esta incluye a las máquinas perforadoras utilizadas durante el ciclo productivo, los equipos auxiliares que intervienen en las operaciones, el personal operativo y de supervisión asignado a cada turno, así como las actividades productivas e improductivas registradas diariamente. También forman parte de la población los indicadores técnicos y económicos derivados del proceso, como los costos operacionales, el uso de recursos, los tiempos estándar y los tiempos muertos identificados durante el ciclo de perforación, datos económicos relacionados con los costos por horas improductivas y la brecha técnica entre la producción real y proyectada, donde se busca el modelo de mejora para la optimización de tiempos de perforación diamantina.

3.3.2 Muestra

La muestra seleccionada está compuesta por un total de seiscientos sesenta (660) reportes operativos de perforación diamantina, correspondientes a un periodo de treinta (30) días de operación continua. Estos reportes fueron generados por once (11) máquinas perforadoras activas durante el mes de evaluación, considerando dos (2) turnos diarios por máquina: uno en el turno día

y otro en el turno noche, lo que genera veintidós (22) reportes diarios. Cada reporte registra de manera estructurada información clave del desempeño operativo, como los metros perforados, los tiempos efectivos e improductivos, la distribución de actividades, la disponibilidad de equipos y el personal asignado por jornada. Esta base de datos constituye un insumo esencial para el modelado del sistema en el software Arena, ya que permite contrastar la situación actual (modelo AS IS) con el escenario optimizado (modelo TO BE) y evaluar la mejora alcanzada en términos de eficiencia y productividad.

3.4 Método, técnicas e instrumentos de recolección de datos

3.4.1 Área de estudio

El área de estudio se encuentra ubicada en una unidad minera al sur del Perú, el alcance comprende al proceso de perforación diamantina.

3.4.2 Limitaciones del proyecto

La omisión de datos específicos y la ubicación exacta de la operación minera se deben al estricto cumplimiento de las políticas de privacidad de la empresa, estas políticas protegen la confidencialidad de la información sensible y garantizan la integridad y seguridad de la operación, evitando riesgos de divulgación no autorizada. Por tanto, se respeta el derecho a la privacidad empresarial y se asegura el cumplimiento de los estándares más rigurosos en materia de confidencialidad.

3.4.3 Materiales y equipos

- Computador personal.
- Software Arena.

- Tablero.
- Matrices de recolección de datos.
- Lapiceros.
- Cámara fotográfica.

3.4.4 Etapa 1. Recopilación de información del proceso de perforación diamantina

Descripción de la empresa

Es una empresa de perforación diamantina con una trayectoria de 30 años, especializada en ofrecer servicios de perforación diamantina, perforación geotécnica y producción tanto para el sector civil como el minero.

En el ámbito civil, nuestros servicios de perforación se emplean para realizar estudios del subsuelo previos a la ejecución de obras civiles, así como para llevar a cabo trabajos destinados a mejorar la estructura del mismo, por otro lado, en el sector minero, proporcionamos servicios de perforación para la identificación, estudio, delimitación y explotación de reservas minerales, contribuyendo a su descubrimiento y eventual incremento.

Máquinas y equipos

Se enlistarán las máquinas y equipos utilizados por la empresa durante el proceso de perforación diamantina.

Tabla 2
Máquinas y equipos

Equipo	Descripción
Overshot (Pescador) y chamber	Se utiliza para extraer la muestra alojada en el inner tube.
Outer tube (Tubo exterior)	Es una tubería que recubre el inner tube y head assembly.
Head assembly (Cabezal)	Se utiliza para ensamblar el pescador.
Inner tube (Tubo interior)	Es una tubería que contiene el testigo o muestra.
Broca diamantada	Es un elemento utilizado para cortar roca sólida y almacenarla en el Inner tube.

Nota: Equipos y maquinas empleadas en perforación diamantina

Fuerza laboral

La empresa cuenta con la organización de su fuerza laboral, representada en la Figura 1.

Figura 1
Organigrama de jerarquía de trabajo

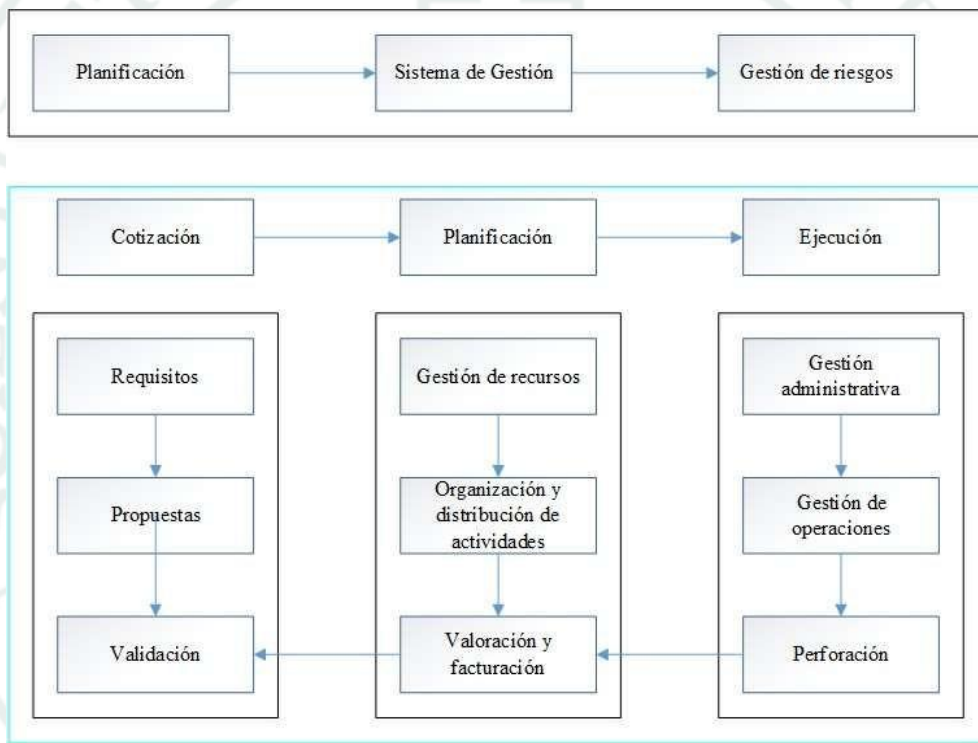


Nota: Organigrama de jerarquía de trabaja en operación diamantina.

Mapeo del proceso de gestión de la empresa

La Figura 2 representa el mapa de procesos de gestión de la empresa para alcanzar resultados óptimos, esta gestión cubre desde la planificación hasta la ejecución de las actividades de perforación, el cual sirve para la identificación de las causas que impiden alcanzar los objetivos establecidos.

Figura 2
Mapa de procesos de trabajo



Nota: Mapa de proceso de trabajo en perforación diamantina

3.4.5 Descripción de actividades en la perforación diamantina

Actualmente el proceso de perforación diamantina que se lleva a cabo en la empresa inicia con el reparto de guardia, continúa con el traslado del personal, llenado de documentos, orden y ejecución de metros de perforación, lo cual se representa en la Figura 3.

Figura 3

Proceso de perforación diamantina



Nota: Diagrama de procesos de perforación diamantina

3.4.6 DAP del servicio de perforación diamantina

El diagrama de análisis de procesos representado en la tabla 3, se utilizará para describir cómo se distribuyen las horas operativas y los metros diarios del servicio de perforación diamantina, con los tiempos promedios obtenidos por la medición cronogramada de 1 a 5 repeticiones de los tiempos empleados en cada actividad, para obtener el tiempo total de perforación.

Tabla 3*Máquinas y equipos utilizados en el proceso de perforación diamantina*

Cursograma analítico (DAP)									
Diagrama N°:				Hoja N°:		Resumen			
Objeto:				Actividad		Actual	Propuesto	Economico	
				Operación					
				Transporte					
Actividad:				Espera					
				Inspección					
				Almacenamiento					
Método:		Actual/ Propuesto		Distancia (m)					
Lugar:				Tiempo (min-hombre)					
Operario:		Fecha:		Ficha Número:		Costo: Mano de Obra			
Compuesto por:		Fecha:		Material					
Aprobado por:		Fecha:		Total					
Descripción			Dist. (m)	Tiempo 1-5 repeticiones (min)	○	⇒	D	Observación	
Reparto de guardia									
Traslado del personal									
Llenado de documentos									
Orden y limpieza									
Traslado a máquina									
Engrasado de equipo de perforación									
Traslado al área de									
Preparación de lodos									
Inspección del lodo									
Traslado a plataforma de									
Armado de cabezal y Inner tube									

Nota: Cursograma analítico (DAP)

3.4.7 Brecha Técnica: Producción real y Producción proyectada en un año base

Para definir cuál es la brecha técnica y el impacto de esta sobre la producción se debe analizar la Producción Real vs Producción Proyectada, es decir, el objetivo que la compañía

establece como avance óptimo diario de producción en metros lineales diarios que se obtuvo durante un año base, el cual es definido de acuerdo a la disponibilidad de información.

El avance definido diario de las máquinas de perforación diamantina en metros lineales se conoce como producción proyectada, mientras que el avance de la perforación en campo se conoce como producción real, y muchas veces no logra el objetivo planteado, en consecuencia, se produce una brecha muy amplia que la producción diaria real no logra superar, incurriendo en costos por ineficiencias. Estos datos deberán ser recopilados para establecer una adecuada línea base y establecer la brecha técnica en función a los metros lineales avanzados.

3.4.8 Costos por horas improductivas

Para conocer el costo que implica las horas improductivas, se deben recopilar datos con respecto a los gastos en los que se incurre por las ineficiencias en el proceso de perforación, basados en el salario de los trabajadores que participan en dicha actividad y sistematizarlos en dos escenarios de producción real y producción proyectada, como se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4
Gasto por tiempo improductivo

Gasto por tiempo improductivo							
Tipo de producción	Personal	Cant.	Salario mensual (S/.)	Salario diario (S/.)	Gasto	por hora	Gasto horas improductivas
Producción real	Perforista						
	Ayudante						
					Costo (S/.)	mensual	
					Costo (S/.)	anual	
Tipo de producción	Personal	Cant.	Salario mensual (S/.)	Salario diario (S/.)	Gasto por hora		Gasto horas improductivas
Producción proyectada	Perforista						
	Ayudante						
					Costo (S/.)	mensual	

					Costo (S/.)	anual	
Tipo de producción	Personal	Cant.	Salario mensual (S/.)	Salario diario (S/.)	Gasto por hora		Gasto horas improductivas
Producción Capacidad de Máquina	Perforista						
	Ayudante						
					Costo (S/.)	mensual	
				Costo (S/.)	anual		

Nota: Improductividad en el trabajo.

3.4.9 Causas de ineficiencia en la ejecución de metros de perforación diamantina



Para determinar las causas que originan una baja eficiencia en la línea de servicio de perforación diamantina se debe analizar la participación de las actividades que afectan directamente a la ejecución de los metros lineales diarios, las principales causas de ineficiencia operativa son las siguientes:

- **Stand by operativo:** Es todo aquel tiempo muerto atribuido al proceso de Perforación, tal como manipulación de tuberías, mezclado de lodos, lavado de sondaje, medición de desviación, perforación de perno de anclaje y cementación.
- **Stand by inoperativo:** Se refiere a todo aquel tiempo muerto que no es parte del proceso de Perforación y que es atribuible a la empresa, como el traslado de personal, orden y limpieza, refrigerio, estandarización, capacitación, instalación / desinstalación de equipos o traslado de accesorios.
- **Mantenimiento:** Es todo aquel tiempo atribuido al proceso de reparación de los equipos de perforación, de forma preventiva y/o correctiva.

- **Stand by cliente:** Se refiere a todo aquel tiempo muerto atribuido al cliente, como por ejemplo la falta de agua, falta de energía, falta de ventilación, espera de programa, etc.

Seguidamente se debe elegir una causa de ineficiencia y determinar sus causas raíz, para poder elaborar un diagrama DAP (Tabla 5), con las actividades que comprenden esta causa raíz.

Tabla 5
Plantilla DAP del proceso seleccionado

Cursograma analítico (DAP)						
Operario/material/equipo						
Diagrama N°:		Hoja N°:		Resumen		
Objeto:				Actividad	Actual	Propuesto
				Operación		
				Transporte		
Actividad: Método: Actual/ Propuesto Lugar: Operario: Ficha Número: Compuesto por: Fecha: Aprobado por: Fecha:				Espera Inspección Almacenamiento Distancia (m) Tiempo (min-hombre) Costo: Mano de Obra Material Total		Observación
Descripción				Dist. (m) Tiempo 1-5 repeticiones (min)	 	
Nota: Cursograma analítico (DAP)						
Total						

Nota: Cursograma analítico empleado

- A continuación, para seguir identificando causas de los tiempos muertos operativos en la actividad seleccionada anteriormente como causa raíz, se deberá realizar una clasificación de elementos sobre sus tiempos. Para ello se elaborará un diagrama de Pareto. Finalmente, para verificar estos tiempos muertos operativos por la causa raíz identificada anteriormente, se debe realizar un diagrama de Hombre – Máquina (Tabla 6), para luego, en base a dicho diagrama elaborar el resumen (Tabla 7) para comprender de manera efectiva la situación actual de las actividades operativas en el proceso seleccionado.

Tabla 6
Plantilla de diagrama hombre – máquina

Diagrama hombre – máquina									
N°		PROCESO:							
Hoja N°		_____							
Fecha:									
Estudio inicial:									
Perforista			Ayudante 01		Ayudante 02		Máquina perforadora		
Actividad	Tiempo	Cargo	Tiempo	Cargo	Tiempo	Cargo	Tiempo	Cargo	

Nota: Diagrama hombre – máquina

Tabla 7
Plantilla resumen de tiempos de acción

Resumen	Tiempo de ciclo (s)	Acción (s)		Ocio (s)	Utilización real (%)	Utilización óptima (%)
Perforista						
Ayudante 01						
Ayudante 02						
Máquina perforadora						

Nota: Tiempos de acción

3.4.10 Etapa 2. Modelo para optimizar tiempos en perforación diamantina

Análisis de la información registrada mediante la aplicación de la técnica de interrogación

Se aplicará la técnica del interrogatorio dirigida a todo el personal pertinente, según lo propuesto por (Vergaray Diestra & Orihuela Barriga, 2022). Esta técnica proporcionará el método necesario para identificar los requerimientos esenciales que permitan minimizar el tiempo de reinicio en la perforación y, al mismo tiempo, mejorar la productividad. Se centrará específicamente en aquellas actividades que puedan beneficiarse de mejoras según lo indicado en el diagrama hombre-máquina. Durante esta evaluación, se formularán preguntas con la finalidad de analizar los detalles del trabajo, tanto preguntas preliminares como preguntas de fondo, buscando identificar hechos, causas y razones, y evitando caer en explicaciones vacías o en análisis superficiales, como se muestra en la Tabla 8.

Tabla 8
Modelo para cuestionario propuesto

Tipo	Pregunta	Respuesta
Preliminar	Estas preguntas abordarán aspectos clave, tales como los objetivos del proyecto, las variables influyentes, las herramientas utilizadas, el contexto geográfico y el impacto esperado del modelo de mejora.	
De fondo	Se abordarán preguntas que explorarán métodos alternativos para reducir los tiempos de cambio de herramientas, estrategias para mejorar la programación de la producción y posibles mejoras en el flujo de trabajo. Se buscará identificar los actores clave involucrados en el proceso y se explorarán tecnologías que puedan utilizarse para optimizar el monitoreo y control de la producción.	

Nota: Cuestionario de flujo de trabajo.

3.4.11 Establecimiento del método propuesto

El requerimiento identificado a través de la técnica de interrogación será implementado en las actividades pertinentes. Luego, se procederá a elaborar el diagrama de actividades del proceso para determinar los tiempos de ejecución de estas actividades con la mejora aplicada. Se realizará un estudio de tiempos para comparar el tiempo promedio con el tiempo estándar mejorado. Esto nos permitirá determinar cuánto tiempo podemos ganar en el proceso de perforación en comparación con el tiempo que se tomaba anteriormente para reiniciar el proceso. Por último, de acuerdo con la metodología de (Vergaray Diestra & Orihuela Barriga, 2022) se empleará la herramienta hombre-máquina para calcular el porcentaje de utilización actualizado para cada individuo involucrado en el proceso revisado. Con el objetivo de determinar el tiempo estándar necesario para realizar una actividad específica, el tiempo requerido para reiniciar la perforación y el tiempo adicional disponible para perforar.

3.4.12 Control de las mejoras propuestas en la actividad seleccionada

Se proyectará el aumento en la producción una vez que se reinicie la operación con la máquina. Esta proyección se basará en el uso de las horas de perforación diarias (24 horas) y por turno (12 horas), así como en la ratio de perforación (metros por hora), obtenido durante un periodo anual. A continuación, se verificará mensualmente la ganancia de tiempo y metros, de acuerdo con la ratio de perforación, utilizando la fórmula proporcionada por (Vergaray Diestra & Orihuela Barriga, 2022). Posteriormente, se procederá a diseñar un formato de control de tiempos y a calcular el presupuesto del modelo propuesto, tanto en soles como en dólares. Se considerarán las herramientas de gestión necesarias y, de ser necesario, se incluirán también las herramientas de trabajo requeridas.

3.4.13 Etapa 3. Evaluación del modelo de optimización por simulación

Descripción del proceso de Simulación Perforación en el software Arena

Se ejecutará una simulación en el software Arena focalizada en el proceso identificado como la causa raíz, durante esta simulación, será crucial reconocer cada una de las actividades dentro del proceso continuo seleccionado. El indicador primordial será la disponibilidad del equipo perforador, cuanto menor sea el tiempo en que la máquina esté en espera (stand by), mayor será el tiempo de perforación mensual, de esta manera, se alcanzará un metraje acumulado superior al final de cada mes (Vergaray Diestra & Orihuela Barriga, 2022).

Ingeniería de métodos AS IS

El método "as is" en el software Arena se refiere a la fase inicial de modelado en la que se representa el sistema tal como es en la realidad, sin introducir cambios o mejoras, en esta etapa, se captura la situación actual del sistema con el fin de comprender su funcionamiento e identificar áreas de oportunidad para la optimización. Esencialmente, el método "as is" proporciona una base sólida para la posterior evaluación y análisis de posibles mejoras en el sistema mediante simulaciones, en el presente caso, para llevar a cabo el proceso de simulación, se creará un esquema detallado en el software Arena, donde se incluirán todas las actividades diseñadas para mejorar el indicador de disponibilidad y aumentar la productividad.

Ingeniería de métodos TO BE

El método "to be" en el software Arena se refiere a la etapa de modelado en la que se introducen cambios planificados o mejoras en el sistema simulado. En esta fase, se implementan ajustes, reconfiguraciones o nuevas estrategias con el objetivo de optimizar el rendimiento del sistema en comparación con la situación actual ("asis"). La simulación se llevará a cabo en el

software Arena teniendo en cuenta los valores que reflejen la mejora del proceso, con respecto a metros obtenidos y tiempo estándar mejorado.

Comparación del AS IS y TO BE

Después de concluir la simulación para AS IS y TO BE, se analizarán los resultados, evaluando las diferencias en términos de eficiencia, tiempos de ciclo, costos y otros indicadores pertinentes. Se redactará un informe detallado que registre los hallazgos, destacando áreas de mejora y ofreciendo recomendaciones para la aplicación efectiva del nuevo estado deseado del proceso. (Vergaray Diestra & Orihuela Barriga, 2022)

Evaluación económica

Se realizará un análisis de viabilidad de inversión utilizando los indicadores VAN, TIR y Costo Beneficio (C/B) para evaluar la rentabilidad y conveniencia de la inversión. Posteriormente, después de haber validado la ingeniería de métodos AS IS y TO BE en el software Arena, se procederá con el análisis del flujo de caja. Esta etapa implica examinar y registrar los ingresos y egresos de efectivo de la empresa durante un período específico.



4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Análisis e interpretación de resultados

4.1.1 *Recopilación de información de actividades en perforación diamantina*

Con base en la información recopilada en los registros diarios de perforación diamantina, se ha estructurado el ciclo de actividades conforme a las operaciones típicas observadas en campo. Estas actividades fueron registradas por empresa contratista, máquina, fecha, turno y sondaje específico. El proceso general incluye:

- Planeamiento y programación de sondajes.
- Instalación y acondicionamiento de equipos.
- Ejecución de perforación (registro de metros por turno).
- Supervisión del avance acumulado (%).
- Gestión de interrupciones (horas de stand by).
- Registro cualitativo de actividades específicas mediante comentarios operativos.

Composición de la base de datos

La base de datos evaluada comprende variables técnicas como:

- Fecha de operación.
- Contratista (EECC).
- Identificador del sondaje (HOLE ID).
- Turno (A o B).

- Metros perforados por turno.
- Avance acumulado.
- Horas de stand by y motivo asociado.
- Comentarios descriptivos de campo.

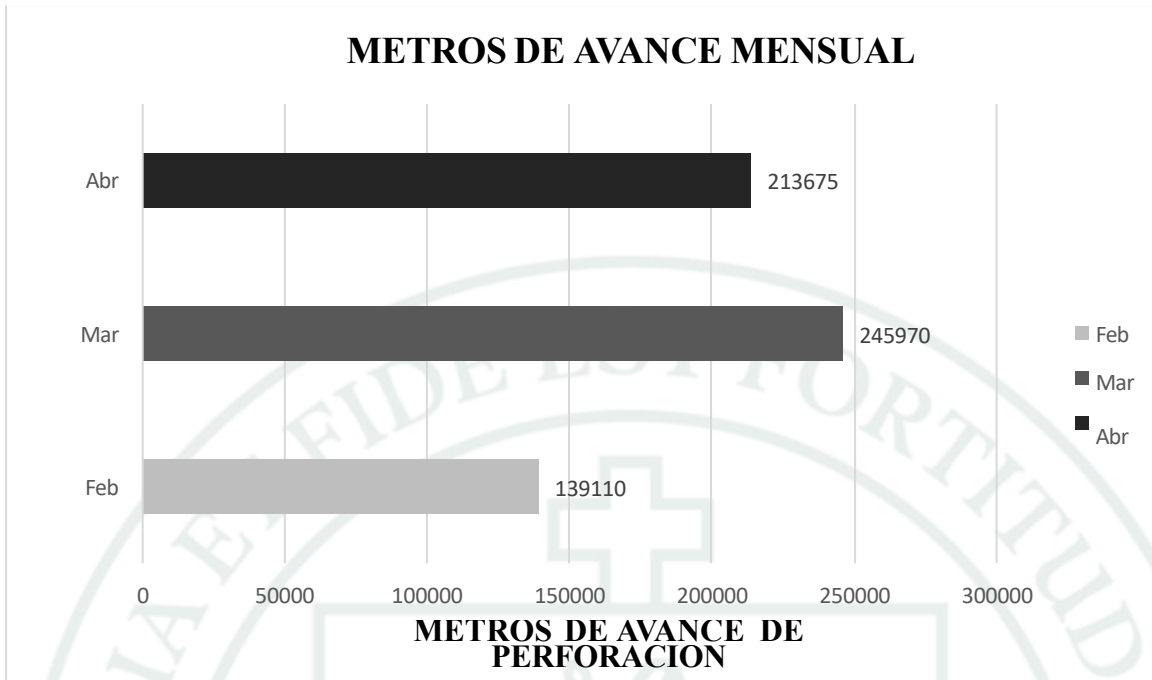
Estos datos fueron clave para estructurar el comportamiento operativo del sistema de perforación diamantina en condiciones reales.

Figura 4
Avance de perforación diaria



Nota: Avance de perforación.

Figura 5
Metros de avance mensual



Nota: Metros de avance de perforación.

4.1.2 Comportamiento del avance operativo

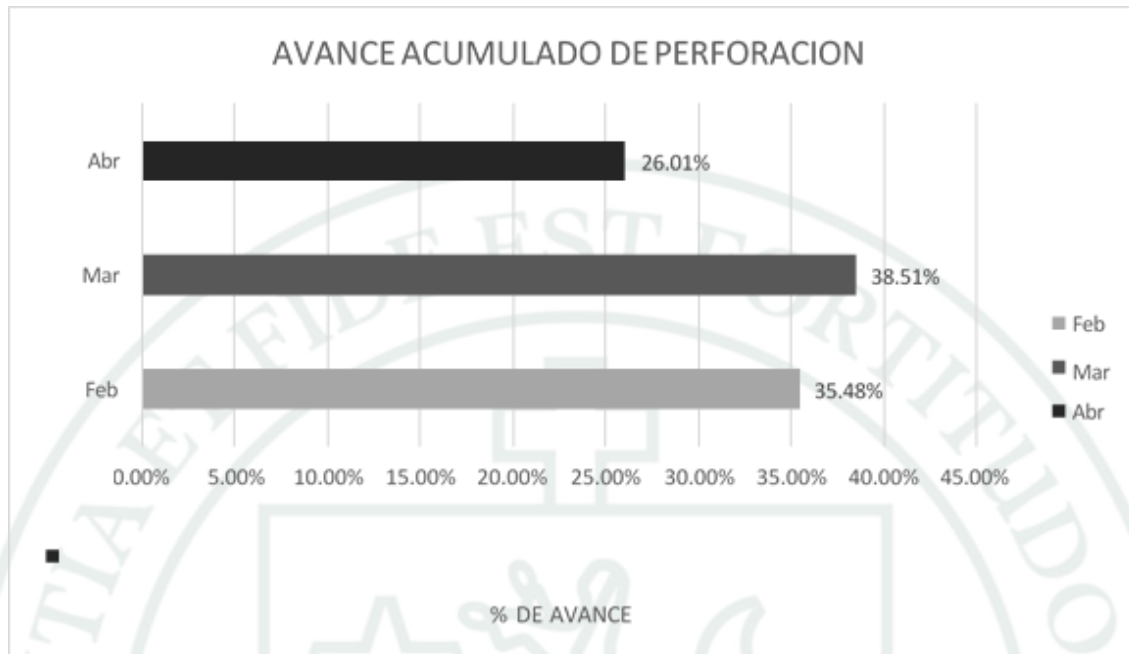
Se observó que los valores de avance diario fluctuaron entre 0 m y 15 m por turno, siendo más frecuentes los valores entre 3 y 9 metros.

El avance acumulado de los sondajes se aproximó progresivamente al 100% del programa, siguiendo una tendencia lineal en condiciones normales.

No obstante, en algunos turnos se registraron periodos sin perforación, atribuibles a eventos de paralización.

Figura 6

Avance acumulado de perforación



Nota: Porcentaje de avance.

4.1.3 Análisis de interrupciones

Las horas de stand by representaron un factor crítico. Aunque en muchos casos no se detalló el motivo, los comentarios asociados permitieron identificar causas frecuentes como:

- Retiro o bajada de tuberías.
- Condiciones adversas del terreno.
- Problemas técnicos con la máquina.
- Cambios de broca o mantenimiento.
- Estas actividades incidieron directamente en la variación de la productividad diaria.

4.1.4 Análisis cualitativo de actividades frecuentes

El análisis semántico de los comentarios operativos permitió identificar que las actividades más recurrentes fueron:

- Acondicionamiento inicial del sondaje.
- Bajada y salida de tuberías.
- Perforación continua.
- Recuperación de testigos.
- Verificación de verticalidad.
- Pausas técnicas por mantenimiento.

Figura 7
Análisis cualitativo de actividades frecuentes

	MÁQUINA	TUR NO	HOLE ID	LINEA	FRO M	TO	PERF ORA D O	PROGRAMA (m)	PENDIENTE (m)
1/02/202	LF 160-01	A	ENC23-	NQ	158	159	9.00	1650.00	57.00
4			26I		4.00	3.00			
1/02/202	LF 160-01	B	ENC23-	NQ	159	160	15.00	1650.00	42.00
4			26I		3.00	8.00			
2/02/202	LF 160-01	A	ENC23-	NQ	160	161	9.00	1650.00	33.00
4			26I		8.00	7.00			
2/02/202	LF 160-01	B	ENC23-	NQ	161	161	0.00	1650.00	33.00
4			26I		7.00	7.00			
3/02/202	LF 160-01	A	ENC23-	NQ	161	162	3.00	1650.00	30.00
4			26I		7.00	0.00			
3/02/202	LF 160-01	B	ENC23-	NQ	162	162	0.00	1650.00	30.00

	MÁQUINA	TUR NO	HOLE ID	LINEA	FRO M	TO	PERF ORA D O	PROGRAMA (m)	PENDIENTE (m)
4			26I		0.00	0.00			
4/02/202	LF 160-01	A	ENC23-	NQ	162	162	6.00	1650.00	24.00
4			26I		0.00	6.00			
4/02/202	LF 160-01	B	ENC23-	NQ	162	163	12.00	1650.00	12.00
4			26I		6.00	8.00			
5/02/202	LF 160-01	A	ENC23-	NQ	163	164	6.00	1650.00	6.00
4			26I		8.00	4.00			
5/02/202	LF 160-01	B	ENC23-	NQ	164	164	0.00	1650.00	6.00
4			26I		4.00	4.00			
6/02/202	LF 160-01	A	ENC23-	NQ	164	165	6.00	1650.00	0.00
4			26I		4.00	0.00			
6/02/202	LF 160-01	B	ENC23-	NQ	165	165	0.00	1650.00	0.00
4			26I		0.00	0.00			
7/02/202	LF 160-01	A	ENC23-	NQ	165	165	0.00	1650.00	0.00
4			26I		0.00	0.00			
7/02/202	LF 160-01	B	ENC23-	NQ	165	165	0.00	1650.00	0.00
4			26I		0.00	0.00			
8/02/202	LF 160-01	A	ENC23-	NQ	165	165	0.00	1650.00	0.00
4			26I		0.00	0.00			
8/02/202	LF 160-01	B	ENC23-	NQ	165	165	0.00	1650.00	0.00
4			26I		0.00	0.00			
9/02/202	LF 160-01	A	ENC23-	NQ	165	165	0.00	1650.00	0.00
4			26I		0.00	0.00			
9/02/202	LF 160-01	B	ENC23-	NQ	165	165	0.00	1650.00	0.00
4			26I		0.00	0.00			
10/02/20	LF 160-01	A	ENC23-	NQ	165	165	0.00	1650.00	0.00
24			26I		0.00	0.00			

	MÁQUINA	TUR NO	HOLE ID	LINEA	FRO M	TO	PERF ORA D O	PROGRAMA (m)	PENDIENTE (m)
10/02/20	LF 160-01	B	ENC23-	NQ	165	165	0.00	1650.00	0.00
24			26I		0.00	0.00			
11/02/20	LF 160-01	A	ENC23-	NQ	165	165	0.00	1650.00	0.00
24			26I		0.00	0.00			
11/02/20	LF 160-01	B	ENC23-	NQ	165	165	0.00	1650.00	0.00
24			26I		0.00	0.00			
12/02/20	LF 160-01	A	ENC23-	NQ	165	165	0.00	1650.00	0.00
24			26I		0.00	0.00			
12/02/20	LF 160-01	B	ENC23-	NQ	165	165	0.00	1650.00	0.00
24			26I		0.00	0.00			
13/02/20	LF 160-01	A	ENC23-	NQ	165	165	0.00	1650.00	0.00
24			26I		0.00	0.00			
13/02/20	LF 160-01	B	ENC23-	NQ	165	165	0.00	1650.00	0.00
24			26I		0.00	0.00			
14/02/20	LF 160-01	A	ENC23-	NQ	165	165	0.00	1650.00	0.00
24			26I		0.00	0.00			
14/02/20	LF 160-01	B	ENC23-	NQ	165	165	0.00	1650.00	0.00
24			26I		0.00	0.00			
15/02/20	LF 160-01	A	ENC23-	NQ	165	165	0.00	1650.00	0.00
24			26I		0.00	0.00			
15/02/20	LF 160-01	B	ENC23-	NQ	165	165	0.00	1650.00	0.00
24			26I		0.00	0.00			
16/02/20	LF 160-01	A	ENC23-	NQ	165	165	0.00	1650.00	0.00
24			26I		0.00	0.00			
16/02/20	LF 160-01	B	ENC23-	NQ	165	165	0.00	1650.00	0.00
24			26I		0.00	0.00			

	MÁQUINA	TUR NO	HOLE ID	LINEA	FRO M	TO	PERF ORA D O	PROGRAMA (m)	PENDIENTE (m)
17/02/20	LF 160-01	A	ENC23-	NQ	165	165	0.00	1650.00	0.00
24			26I		0.00	0.00			
17/02/20	LF 160-01	B	ENC23-	NQ	165	165	0.00	1650.00	0.00
24			26I		0.00	0.00			
18/02/20	LF 160-01	A	ENC23-	NQ	165	165	0.00	1650.00	0.00
24			26I		0.00	0.00			
18/02/20	LF 160-01	B	ENC23-	NQ	165	165	0.00	1650.00	0.00
24			26I		0.00	0.00			
19/02/20	LF 160-01	A	ENC23-	NQ	165	165	0.00	1650.00	0.00
24			26I		0.00	0.00			
19/02/20	LF 160-01	B	ENC23-	NQ	165	165	0.00	1650.00	0.00
24			26I		0.00	0.00			
20/02/20	LF 160-01	A	ENC23-	NQ	165	165	0.00	1650.00	0.00
24			26I		0.00	0.00			
20/02/20	LF 160-01	B	492-68	HQ	945.	945.	0.00	1500.00	555.00
24					00	00			
21/02/20	LF 160-01	A	492-68	HQ	945.	945.	0.00	1500.00	555.00
24					00	00			
21/02/20	LF 160-01	B	492-68	HQ	945.	945.	0.00	1500.00	555.00
24					00	00			
22/02/20	LF 160-01	A	492-68	HQ	945.	945.	0.00	1500.00	555.00
24					00	00			
22/02/20	LF 160-01	B	492-68	HQ	945.	945.	0.00	1500.00	555.00
24					00	00			
23/02/20	LF 160-01	A	492-68	HQ	945.	945.	0.00	1500.00	555.00
24					00	00			

	MÁQUINA	TUR NO	HOLE ID	LINEA	FRO M	TO	PERF ORA D O	PROGRAMA (m)	PENDIENTE (m)
23/02/20	LF 160-01	B	492-68	HQ	945.	945.	0.00	1500.00	555.00
24					00	00			
24/02/20	LF 160-01	A	492-68	HQ	945.	945.	0.00	1500.00	555.00
24					00	00			

Nota: Actividades frecuentes de trabajo.

4.1.5 Desarrollo de modelo en Arena para optimizar tiempos de perforación diamantina

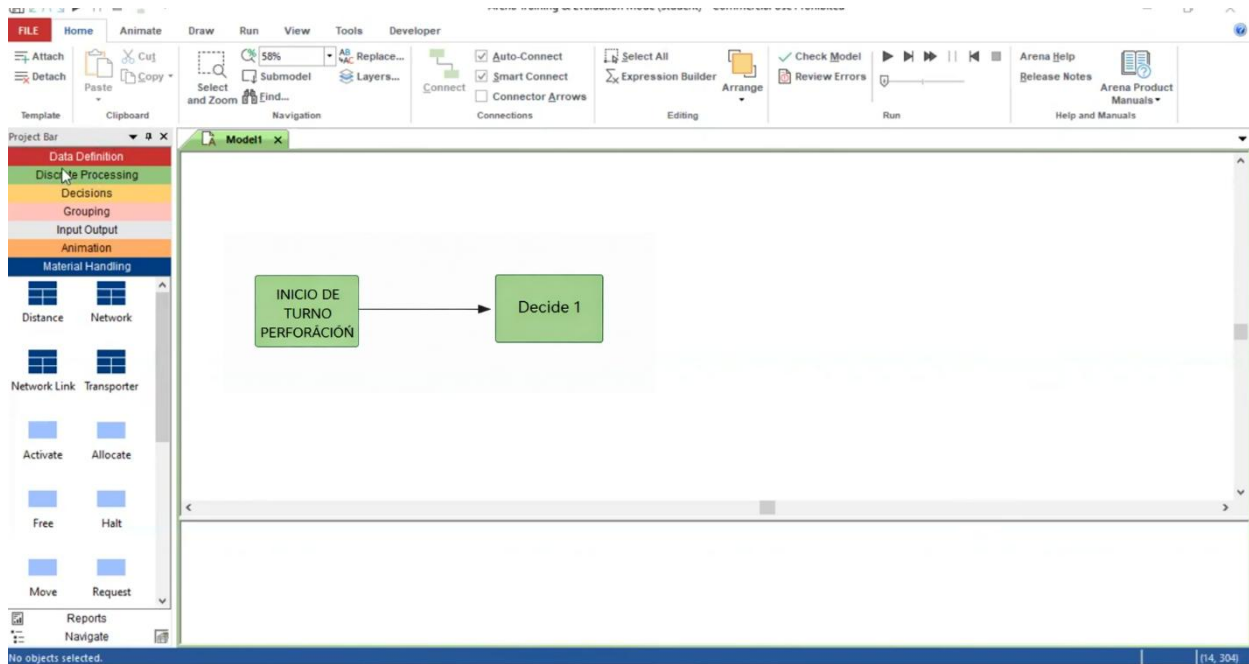
Definir actividades del proceso

Basado en la base de datos, los procesos típicos serían:

- Inicio de turno.
- Preparación de equipo.
- Perforación activa.
- Mantenimiento / Stand-by.
- Cambio de plataforma.
- Fin de turno.

Se empieza a realizar los procesos de la perforación en el software Arena.

Figura 8
Actividades del proceso software Arena



Nota: Diagrama software Arena.

Obtener tiempos promedio de cada etapa

Extraeremos desde la hoja “BASE DE DATOS” los valores clave.

Promedios clave que se usarán en el modelo Arena:

- Horas trabajadas por turno (promedio): 11.97 horas.
- Horas de mantenimiento (stand-by): 1.14 horas.
- Total horas por turno (trabajo + mantenimiento): 13.12 horas.

Construir el modelo en Arena

A. Crear las entidades

- Entity: Turno (representa cada jornada de perforación)

B. Agregar módulos Create

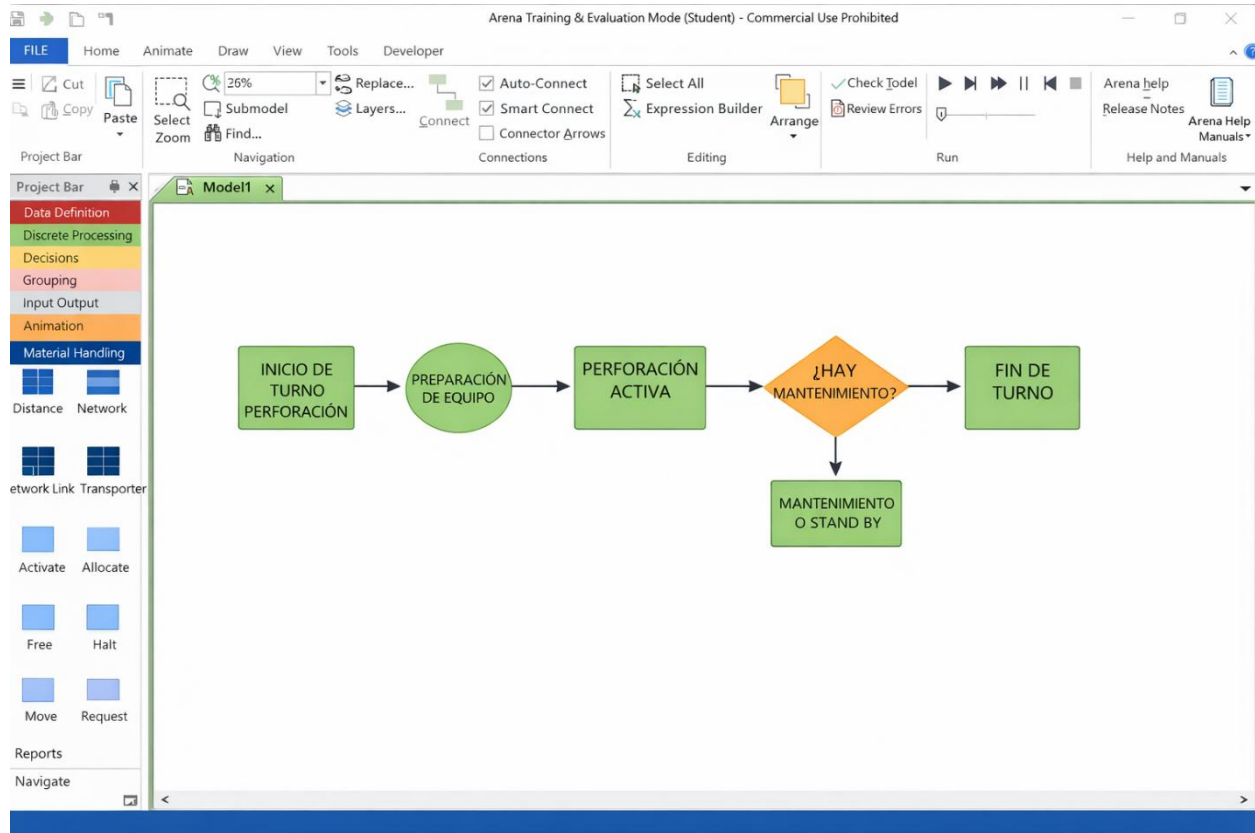
- Nombre: Inicio de Turno
- Arrival rate: 1 cada 13.12 horas (para simular un turno diario) Delay – Preparación
- Tiempo fijo de preparación Process – Perforación activa
- Tiempo: distribución basada en el promedio Recurso: Taladro
- Decide – ¿Mantenimiento requerido?
- Probabilidad: según % de turnos con >0 h mantenimiento Delay – Mantenimiento o stand-by
- Tiempo: TRIA(0.5, 1.1, 2.5)
- Dispose – Fin de turno

C. Agregar recursos

- Taladro
- Perforista
- Ayudantes

Simulación en Arena perforación diamantina.

Figura 9
Construcción de modelo en Arena



Nota: Actividad software Arena.

Tabla 9
Resultados de simulación en Arena

ProjectName	Project RunDateTime	Replication	Name	Type	Source	Average	BatchMean sHalfWidth	Minimum	Maximum
Unna med Project	2025-05-29 17:46:50	1	Entity 1	WIP	Entity	45.533 31077	2E+20	0	98
Unna med Project	2025-05-29 17:46:50	1	PERFORACION ACTIVA.Queue	Number Waiting	Queue	44.236 93023	2E+20	0	97
Unna med Project	2025-05-29 17:46:50	1	TALADRO	Instantaneous Utilization	Resource	0.9048 61111	2E+20	0	1

Unna med Project	2025-05-29 17:46:50	1	TALAD R O	Number Busy	Resorce	0.9048 61111	2E+20	0	1
Unna med Project	2025-05-29 17:46:50	1	TALAD R O	Number Scheduled	Resorce	1	2E+20	1	1

Nota: Análisis del software Arena.

4.1.6 Comparación de funcionalidades de Arena con otras herramientas de simulación

Con el fin de sustentarla elección del software Arena como herramienta principal para la simulación del proceso de perforación diamantina, se realizó una comparación técnica con otros programas utilizados en la industria minera, tales como Simio, AnyLogic, Vulcan y MineSched. La evaluación se centró en criterios clave como capacidad de simulación basada en eventos discretos, facilidad de uso, adaptabilidad a procesos secuenciales, costos y aplicabilidad específica en minería operativa.

Los resultados de la comparación se sintetizan en la Tabla 10.

Tabla 10
Comparación de funcionalidades de Arena y otras herramientas de simulación

Criterio	Arena	Simio	AnyLogic	Vulcan/MineSched
Simulación por eventos discretos	Alta	Alta	Alta	No
Facilidad de uso	Intuitiva	Media	Técnica	Compleja
Procesos cíclicos (turnos)	Alta	Moderada	Alta	Baja
Aplicabilidad minera operativa	Alta	Moderada	Moderada	Alta (solo planificación)
Costo de licencia	Medio	Alto	Alto	Muy alto

Nota: Comparación del software Arena con otras herramientas de simulación

Se concluyó que Arena Simulation presenta una relación óptima entre funcionalidad, adaptabilidad y facilidad de implementación, lo que la hace ideal para modelar procesos repetitivos como la perforación diamantina. Su arquitectura basada en eventos discretos permite analizar de forma detallada los cuellos de botella y tiempos improductivos, facilitando la toma de decisiones operativas.

4.1.7 Evaluación de la mejora alcanzada mediante el modelo de simulación desarrollado

La simulación se desarrolló en dos escenarios: el modelo AS IS, que representa el proceso actual registrado a partir de 660 reportes operativos reales, y el modelo TO BE, que incorpora mejoras diseñadas mediante la aplicación de ingeniería de métodos y reo organización de actividades. (Vergaray Diestra & Orihuela Barriga, 2022)

Los principales resultados comparativos entre ambos modelos se presentan en la Tabla 11.

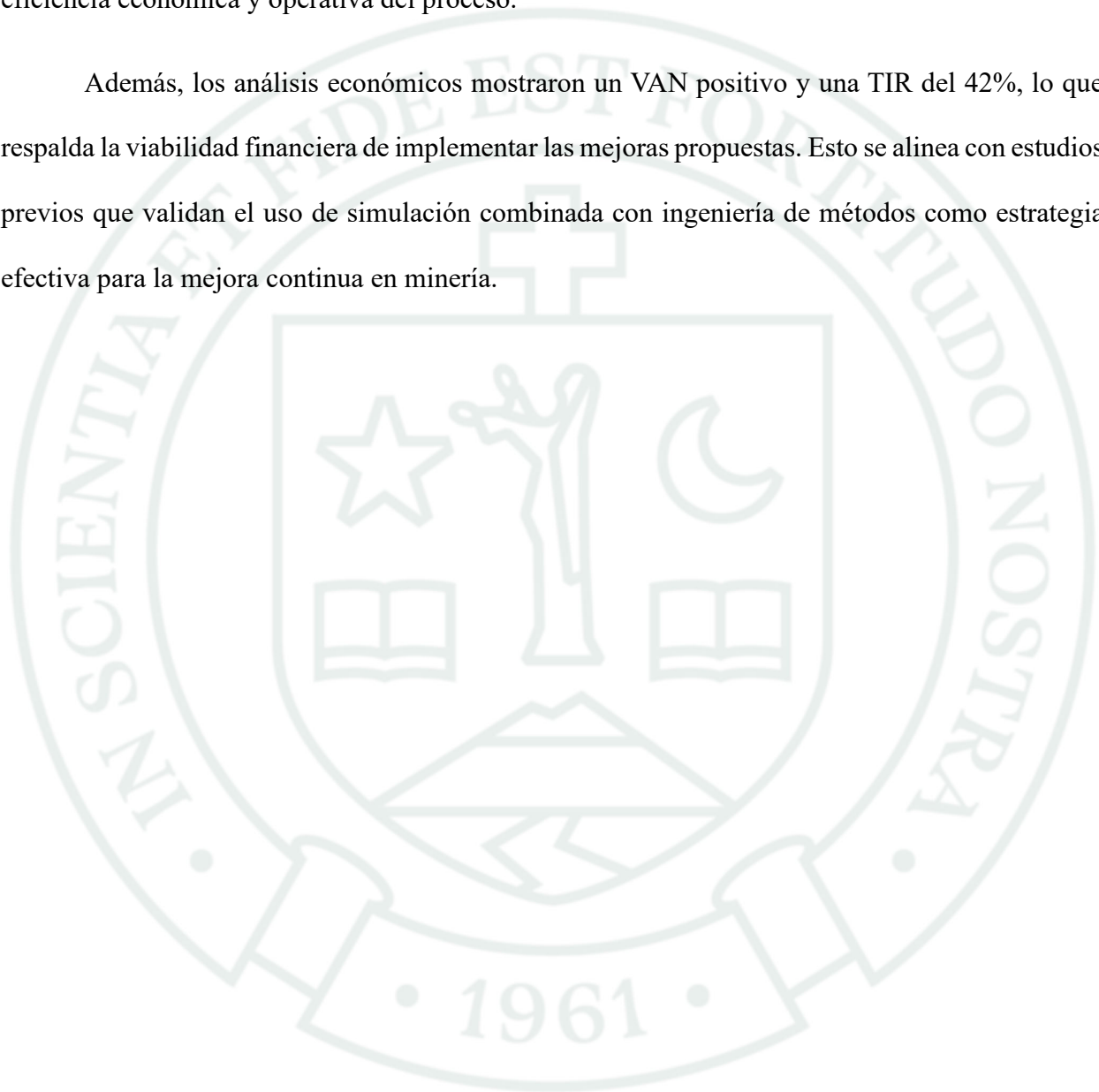
Tabla 11
Comparación entre modelo actual (AS IS) y modelo propuesto (TO BE)

Indicador	Modelo AS IS	Modelo TO BE	Variación (%)
Promedio de metros perforados por turno	7.5 m	11.2 m	+49.3%
Tiempo improductivo mensual (stand by)	132 horas	68 horas	-48.5%
Tiempo estándar por turno	720 minutos	640 minutos	-11.1%
Costo operativo por ciclo	30,000 USD	25,400 USD	-15.3%
Valor Actual Neto (VAN)	—	S/. 203,000	—
Tasa Interna de Retorno (TIR)	—	42%	—

Nota: Comparación entre modelos.

Estos resultados evidencian que la implementación del modelo TO BE permite una mejora significativa en la productividad, al reducir los tiempos muertos y optimizar el uso de recursos. En particular, la producción por turno aumentó en un 49.3%, lo cual repercute positivamente en la eficiencia económica y operativa del proceso.

Además, los análisis económicos mostraron un VAN positivo y una TIR del 42%, lo que respalda la viabilidad financiera de implementar las mejoras propuestas. Esto se alinea con estudios previos que validan el uso de simulación combinada con ingeniería de métodos como estrategia efectiva para la mejora continua en minería.



CONCLUSIONES

- A través del análisis de 660 reportes operativos diarios, se recopiló información detallada sobre las actividades críticas del proceso de perforación diamantina. Esto permitió identificar tareas con alta carga improductiva como el traslado de herramientas, cambios de broca y acondicionamiento de sondaje.
- La aplicación de un modelo de mejora basado en ingeniería de métodos y simulado mediante el software Arena permitió optimizar significativamente los tiempos operativos de perforación diamantina en una unidad minera al sur del Perú. Se logró incrementar la productividad por turno en un 49.3%, reducir los tiempos improductivos mensuales en 48.5%, y disminuir los costos operativos por ciclo en más de 4,500 USD, confirmando así la viabilidad técnica y económica del modelo desarrollado. Se logró desarrollar un modelo digital de simulación en Arena, utilizando datos reales de campo e integrando diagramas Hombre-Máquina, matrices DAP y análisis de tiempos. El modelo AS IS reprodujo fielmente el proceso actual, mientras que el modelo TO BE incorporó mejoras como la reorganización de tareas y reducción de tiempos ociosos.
- La comparación de Arena con otras herramientas de simulación como Simio, AnyLogic y Vulcan, demostró que Arena presenta ventajas clave para procesos cíclicos como la perforación diamantina, incluyendo mayor facilidad de modelado, validación visual efectiva y un menor costo de implementación, lo que justificó su elección como herramienta principal. La evaluación de los indicadores simulados evidenció mejoras sustanciales en la eficiencia, la productividad y la rentabilidad del proceso. La aplicación del modelo TO BE permitió un aumento de los metros

perforados por turno (de 7.5 a 11.2 m), reducción del tiempo estándar y obtención de un VAN positivo y TIR del 42%, lo que respalda la implementación del modelo como una solución escalable y replicable en otras operaciones similares.



RECOMENDACIONES

- Se recomienda implementar progresivamente el modelo TO BE en campo, empezando por las máquinas con mayor tiempo improductivo, y realizar una validación continua de los resultados mediante indicadores clave como metros/turno y porcentaje de stand by.
- La empresa minera debe fortalecer la capacitación del personal en el uso de herramientas de análisis de métodos y control de tiempos operativos, fomentando una cultura de mejora continua y toma de decisiones basada en datos.
- Se sugiere integrar el software Arena dentro de los procesos de planificación operativa de corto plazo, de modo que se puedan evaluar distintos escenarios de producción antes de su ejecución en campo.
- Es recomendable actualizar periódicamente la base de datos operativa con información real de cada ciclo de perforación, lo que permitirá mantener la precisión del modelo y detectar nuevas oportunidades de mejora.
- Finalmente, se plantea replicar esta metodología de simulación en otros procesos operativos mineros, como carguío, acarreo o ventilación, aprovechando la versatilidad del software Arena y los beneficios obtenidos en esta aplicación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Becerra Chamorro, J. A. (2021). Gestión de la perforación diamantina a través de metodologías ágiles(SCRUM–KANBAN).
<https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/21030>
- Bellido Bravo, E. (1969). Sinopsis de la Geología del Perú - [Boletín A 22].
<https://repositorio.ingemmet.gob.pe/handle/20.500.12544/140>
- Boero Patroni, O. S. (2021). Diagnóstico y propuesta de mejora en la empresa Geotec. [Tesis de pregrado, Universidad de Lima], Repositorio institucional de la Universidad de Lima.
<https://repositorio.ulima.edu.pe/handle/20.500.12724/13712>
- Chacón Abad, N. I., Canchaya Moya, S., Morche, W., & Aranda Vercelli, A. (1997). Metalogenia como guía para la prospección minera en el Perú.
<https://repositorio.ingemmet.gob.pe/handle/20.500.12544/3680>
- Congreso de la República. (1993). Constitución Política del Perú. In Derechos fundamentales de la persona (Artículo 7º). <https://www.gob.pe/>
- Correa Espinal, A., Gómez Montoya, R.A., Botero Pérez, C. (2012). La Ingeniería de Métodos y Tiempos como herramienta en la Cadena de Suministro.
<https://revistas.eia.edu.co/index.php/SDP/article/view/356/349>
- Durán, F. A. (2007). Ingeniería de métodos. Globalización: Técnicas para el manejo eficiente de recursos en organizaciones fabriles, de servicios y hospitalarias, 15-18.
<https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/21030>.
- Fierro Ahumada, E.U, Rojas Ramirez, C.A., Zuñiga Castro, R.A. (2015). Sistema de Perforación y sondaje para perforación diamantina.
<https://patentimages.storage.googleapis.com/49/05/0e/bf9d161f8cfc3a/WO2015120566A1.pdf>
- Jiménez, L. (2022). Análisis y propuesta de mejora de la calidad de perforación a diamantina utilizando el proceso seis sigma aplicando las etapas DMAIC (definir, medir, analizar, mejorar y controlar), Zamora-Ecuador 2022. Escuela de posgrado Newman.
<https://repositorio.epnewman.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12892/747/TRABAJO%2>

ODE_INV_Luis%20Xavier%20Jim%c3%a9nez%20Mart%c3%adnez.pdf?sequence=1&isAllowed=y

- Kanawaty, G., & OIT, G. (1996). Introducción al estudio del trabajo. MCA perforaciones (2022). Perforación Diamantina en Superficie y Subterráneo.
<https://mcaperforaciones.com/#:~:text=La%20gran%20ventaja%20del%20sistema,llevar%20a%20cabo%20un%20estudio.>
- Mejía Salazar, K. P. (2019). Optimización del proceso de perforación y voladura subterránea para la Sociedad Minera Oro Sol Uno (Bachelor's thesis, Universidad del Azuay).
<https://dspace.uazuay.edu.ec/handle/datos/8932>
- Meza Huallpa, Q. L. (2014). Análisis y mejora de procesos en la sección matricería para la fabricación de brocas para perforación diamantina en una empresa metal mecánica fabricante de productos.
<https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/7445>
- MINEM. (2011). Ley de Seguridad y Salud en el Trabajo Ley N° 29783. Congreso de la Republica.
<https://www.gob.pe/>
- MINEM. (2016). Aprueban Reglamento de Seguridad y Salud Ocupacional en Minería D.S.N°024-2016-EM.MINEM.
<https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/901782/DS-024-2016-EM.pdf?v=1593568355>
- MINEM. (2023). Ley General de Minería, aprobado por DS N° 014 - 92 - EM (primera ed.). MINEM.
<https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/4425547/TUO%20Ley%20General%20de%20Miner%C3%ADa%20.pdf?v=1681359360>
- Ministerio de Energía y Minas (MINEM). (2023). Reglamento de Procedimientos Mineros D.S.N°020-2020-EM (Marzo ed.). MINEM.
<https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/3442706/Reglamento%20de%20Procedimientos%20Mineros%20Ed.%202023.pdf?v=1681360532>

Mojonero Aguilar, G. (2023). Análisis técnico económico para la selección óptima de la máquina perforadora diamantina por la empresa REMICSA DRILLING SA unidad minera Yauliyacu-Lima.

<http://repositorio.unsaac.edu.pe/handle/20.500.12918/7231>

Montes Liñan, M. M., Quispe Capcha, C. D. P., Rossi Manrique, C. N., Zegarra Tapia, R. C., & Zhou, Z. (2023). Importación y venta de accesorios para la perforación diamantina. https://repositorioacademico.upc.edu.pe/bitstream/handle/10757/658278/Montes_LM.pdf?sequence=3

Portilla, H. E., Suárez, D. F., & Corzo, R. (2012). Metodología para la optimización de parámetros de perforación a partir de propiedades geomecánicas, 10(2). <https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistafuentes/article/view/3325>

Pees, S. T. (2004). Inventor and History. Rescatado de Oil History: <http://www.petroleumhistory.org/OilHistory/pages/Diamond/inventor.html>

Ramos Galarza, C. (2020). Los Alcances de una Investigación. *CienciAmérica*, 9(3). <http://dx.doi.org/10.33210/ca.v9i3.336>

Rivas Gaete, D. A., & Ugarte, C. (2019). Optimizar el proceso de fortificación de minera Florida. <https://repositorio.udla.cl/xmlui/handle/udla/238>

Rivas Gaete, D. A., & Ugarte, C. (2019). Optimizar el proceso de fortificación de minera Florida. <https://repositorio.udla.cl/xmlui/handle/udla/238>

Rodríguez, H.; Yuliana, M.; Fernando, S. y Hernando, S. (2014). Optimización de parámetros de perforación con mse e impacto en la construcción de un pozo en el campo Yarigú. <https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistafuentes/article/view/4790>

Rojas Linares, E. L. (2009) Ecosistema de la bahía de Paracas. Facultad de Ingeniería Geológica, Minera y Metalúrgica. [Tesis Doctoral, UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA]. <https://www.monografias.com/trabajos-pdf4/ecologia-bahia-paracas-peru/ecologia-bahia-paracas-peru.pdf>

- Rojas, F. (2022). Ingeniería de Métodos para incrementar la productividad en las operaciones de la Empresa Nexa Resources El Porvenir S.A.C, Pasco, 2022. Universidad Cesar Vallejo. https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/105761/Rojas_LFJSD.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Scott, D. (2006). The History and Impact of Synthetic Diamond. ResearchGate: http://pdc-guru.com/uploads/2/8/7/9/2879895/daw_dscott_history-and-impact-of-synthetic-diamond-cutters-in-og.pdf
- S.A.C. <https://www.perforacionesdiamantinas.com/laperforaciondiamantina-desde-la-perspectiva-tecnico-operativa/>
- Salas Vásquez, A. T. (2016). Análisis y mejora de la calidad en el proceso de perforación en diamantina utilizando la metodología DMAIC (Doctoral dissertation, Universidad Andrés Bello). Salas Vásquez, A. T. (2016). Análisis y mejora de la calidad en el proceso de perforación en diamantina utilizando la metodología DMAIC (Doctoral dissertation, Universidad Andrés Bello). <https://repositorio.unab.cl/xmlui/handle/ria/3670>
- Silupú Silupú, M. J. (2022). Optimización de tiempos operacionales en la perforación, voladura y acarreo. Unidad Minera Capacho de Oro I-Minera Vicus SAC- Barranca-Lima. <https://repositorio.unp.edu.pe/handle/20.500.12676/3483>
- Vergaray Diestra, E. R., & Orihuela Barriga, M. E. (2022). Propuesta de mejora para optimizar los tiempos de perforación efectiva con la finalidad de incrementar la productividad en una contrata de perforación diamantina de la Unidad Minera San Cristóbal aplicando ingeniería de métodos y TPM. <https://repositorioacademico.upc.edu.pe/handle/10757/659006>
- Vigo Llanos, W. H. (2016). Tecnologías Limpias en el Proceso de Perforación Diamantina en la Etapa de Exploración Geológica en Minería, Cajamarca, 2016. <https://repositorio.uncp.edu.pe/handle/20.500.12894/1657>

Boero, M. (2021). Simulación de procesos operativos en minería subterránea. Universidad Nacional de San Agustín. Jiménez, A. (2022). Análisis y propuesta de mejora de la calidad de perforación a diamantina utilizando el proceso seis sigma aplicando las etapas DMAIC.

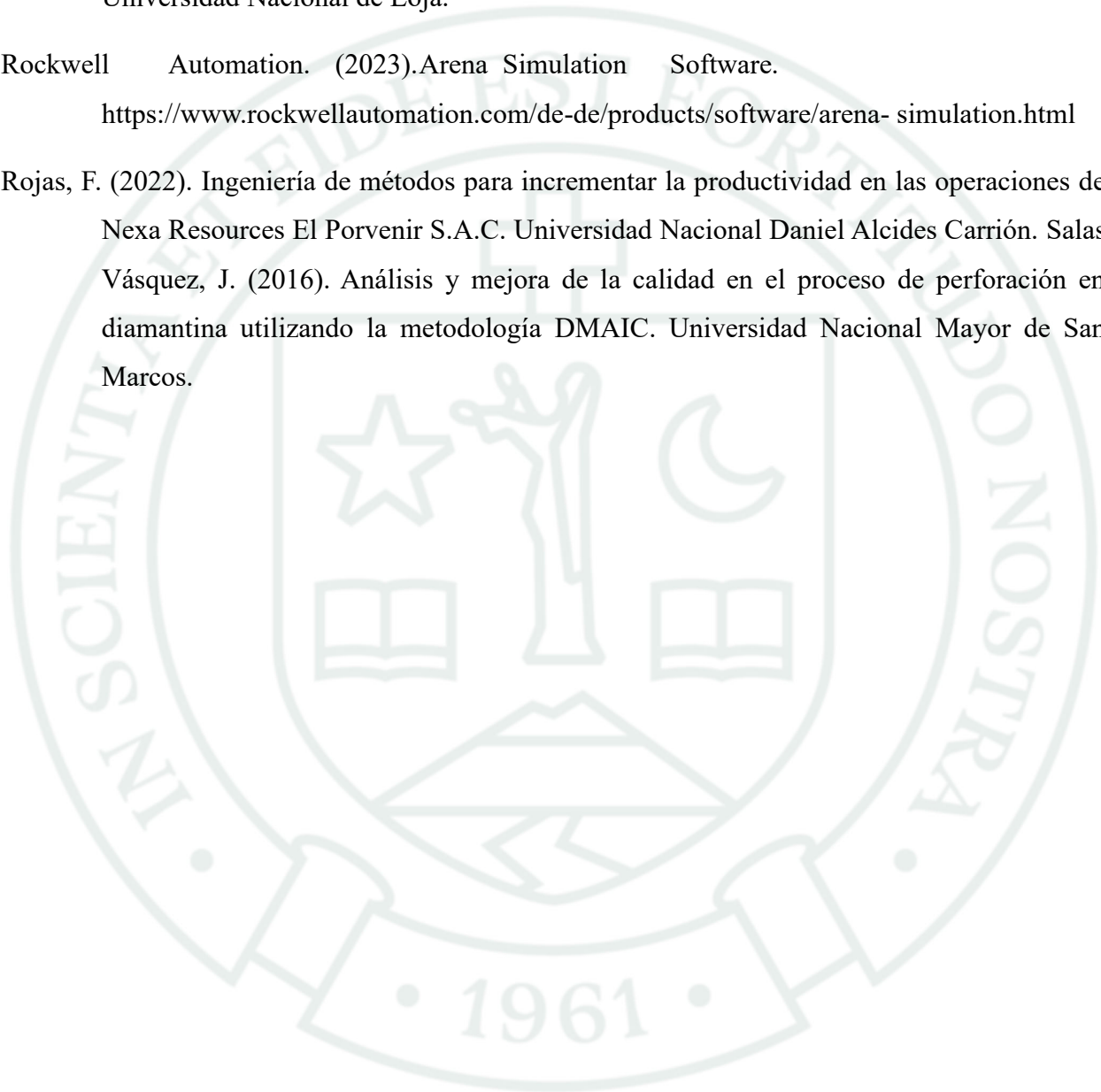
Universidad Nacional de Loja.

Rockwell Automation. (2023). Arena Simulation Software.

<https://www.rockwellautomation.com/de-de/products/software/arena-simulation.html>

Rojas, F. (2022). Ingeniería de métodos para incrementar la productividad en las operaciones de Nexa Resources El Porvenir S.A.C. Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión. Salas

Vásquez, J. (2016). Análisis y mejora de la calidad en el proceso de perforación en diamantina utilizando la metodología DMAIC. Universidad Nacional Mayor de San Marcos.



ANEXOS

Anexo 1

Data de perforación diamantina

FECHA	MÁQUINA	TURNO	HOLE ID	LINEA	FROM	TO
1/02/2024	LF 160-01	A	ENC23-26I	NQ	1584.00	1593.00
1/02/2024	LF 160-01	B	ENC23-26I	NQ	1593.00	1608.00
2/02/2024	LF 160-01	A	ENC23-26I	NQ	1608.00	1617.00
2/02/2024	LF 160-01	B	ENC23-26I	NQ	1617.00	1617.00
3/02/2024	LF 160-01	A	ENC23-26I	NQ	1617.00	1620.00
3/02/2024	LF 160-01	B	ENC23-26I	NQ	1620.00	1620.00
4/02/2024	LF 160-01	A	ENC23-26I	NQ	1620.00	1626.00
4/02/2024	LF 160-01	B	ENC23-26I	NQ	1626.00	1638.00
5/02/2024	LF 160-01	A	ENC23-26I	NQ	1638.00	1644.00
5/02/2024	LF 160-01	B	ENC23-26I	NQ	1644.00	1644.00
6/02/2024	LF 160-01	A	ENC23-26I	NQ	1644.00	1650.00
6/02/2024	LF 160-01	B	ENC23-26I	NQ	1650.00	1650.00
7/02/2024	LF 160-01	A	ENC23-26I	NQ	1650.00	1650.00
7/02/2024	LF 160-01	B	ENC23-26I	NQ	1650.00	1650.00
8/02/2024	LF 160-01	A	ENC23-26I	NQ	1650.00	1650.00
8/02/2024	LF 160-01	B	ENC23-26I	NQ	1650.00	1650.00
9/02/2024	LF 160-01	A	ENC23-26I	NQ	1650.00	1650.00
9/02/2024	LF 160-01	B	ENC23-26I	NQ	1650.00	1650.00
10/02/2024	LF 160-01	A	ENC23-26I	NQ	1650.00	1650.00
10/02/2024	LF 160-01	B	ENC23-26I	NQ	1650.00	1650.00
11/02/2024	LF 160-01	A	ENC23-26I	NQ	1650.00	1650.00
11/02/2024	LF 160-01	B	ENC23-26I	NQ	1650.00	1650.00
12/02/2024	LF 160-01	A	ENC23-26I	NQ	1650.00	1650.00
12/02/2024	LF 160-01	B	ENC23-26I	NQ	1650.00	1650.00
13/02/2024	LF 160-01	A	ENC23-26I	NQ	1650.00	1650.00
13/02/2024	LF 160-01	B	ENC23-26I	NQ	1650.00	1650.00
14/02/2024	LF 160-01	A	ENC23-26I	NQ	1650.00	1650.00
14/02/2024	LF 160-01	B	ENC23-26I	NQ	1650.00	1650.00
15/02/2024	LF 160-01	A	ENC23-26I	NQ	1650.00	1650.00
15/02/2024	LF 160-01	B	ENC23-26I	NQ	1650.00	1650.00
16/02/2024	LF 160-01	A	ENC23-26I	NQ	1650.00	1650.00
16/02/2024	LF 160-01	B	ENC23-26I	NQ	1650.00	1650.00
17/02/2024	LF 160-01	A	ENC23-26I	NQ	1650.00	1650.00
17/02/2024	LF 160-01	B	ENC23-26I	NQ	1650.00	1650.00

FECHA	MÁQUINA	TURNO	HOLE ID	LINEA	FROM	TO
18/02/2024	LF 160-01	A	ENC23-26I	NQ	1650.00	1650.00
18/02/2024	LF 160-01	B	ENC23-26I	NQ	1650.00	1650.00
19/02/2024	LF 160-01	A	ENC23-26I	NQ	1650.00	1650.00
19/02/2024	LF 160-01	B	ENC23-26I	NQ	1650.00	1650.00
20/02/2024	LF 160-01	A	ENC23-26I	NQ	1650.00	1650.00
20/02/2024	LF 160-01	B	492-68	HQ	945.00	945.00
21/02/2024	LF 160-01	A	492-68	HQ	945.00	945.00
21/02/2024	LF 160-01	B	492-68	HQ	945.00	945.00
22/02/2024	LF 160-01	A	492-68	HQ	945.00	945.00
22/02/2024	LF 160-01	B	492-68	HQ	945.00	945.00
23/02/2024	LF 160-01	A	492-68	HQ	945.00	945.00
23/02/2024	LF 160-01	B	492-68	HQ	945.00	945.00
24/02/2024	LF 160-01	A	492-68	HQ	945.00	945.00
24/02/2024	LF 160-01	B	492-68	HQ	945.00	945.00
25/02/2024	LF 160-01	A	492-68	HQ	945.00	945.00
25/02/2024	LF 160-01	B	492-68	HQ	945.00	945.00
26/02/2024	LF 160-01	A	492-68	HQ	945.00	945.00
26/02/2024	LF 160-01	B	492-68	HQ	945.00	945.00
27/02/2024	LF 160-01	A	492-68	HQ	945.00	945.00
27/02/2024	LF 160-01	B	492-68	HQ	945.00	945.00
15/02/2024	LF 160-02	A	495-59A	NQ	1278.00	1284.00
15/02/2024	LF 160-02	B	495-59A	NQ	1284.00	1287.00
16/02/2024	LF 160-02	A	495-59A	NQ	1287.00	1302.00
16/02/2024	LF 160-02	B	495-59A	NQ	1302.00	1320.00
17/02/2024	LF 160-02	A	495-59A	NQ	1320.00	1332.00
17/02/2024	LF 160-02	B	495-59A	NQ	1332.00	1332.00
18/02/2024	LF 160-02	A	495-59A	NQ	1332.00	1344.00
18/02/2024	LF 160-02	B	495-59A	NQ	1344.00	1356.00
19/02/2024	LF 160-02	A	495-59A	NQ	1356.00	1368.00
19/02/2024	LF 160-02	B	495-59A	NQ	1368.00	1383.00
20/02/2024	LF 160-02	A	495-59A	NQ	1383.00	1392.00
20/02/2024	LF 160-02	B	495-59A	NQ	1392.00	1392.00
21/02/2024	LF 160-02	A	495-59A	NQ	1392.00	1404.00
21/02/2024	LF 160-02	B	495-59A	NQ	1404.00	1416.00
22/02/2024	LF 160-02	A	495-59A	NQ	1416.00	1416.00
22/02/2024	LF 160-02	B	495-59A	NQ	1416.00	1428.00
23/02/2024	LF 160-02	A	495-59A	NQ	1428.00	1440.00
23/02/2024	LF 160-02	B	495-59A	NQ	1440.00	1452.00

FECHA	MÁQUINA	TURNO	HOLE ID	LINEA	FROM	TO
24/02/2024	LF 160-02	A	495-59A	NQ	1452.00	1467.00
24/02/2024	LF 160-02	B	495-59A	NQ	1467.00	1476.00
25/02/2024	LF 160-02	A	495-59A	NQ	1476.00	1491.00
25/02/2024	LF 160-02	B	495-59A	NQ	1491.00	1500.00
26/02/2024	LF 160-02	A	495-59A	NQ	1500.00	1509.00
26/02/2024	LF 160-02	B	495-59A	NQ	1509.00	1515.00
27/02/2024	LF 160-02	A	495-59A	NQ	1515.00	1515.00
27/02/2024	LF 160-02	B	495-59A	NQ	1515.00	1518.00
1/02/2024	LF 160 - 3	A	HIDROCHAN	PROYECTO	0.00	15.00
1/02/2024	LF 160 - 3	B	HIDROCHAN	PROYECTO	0.00	6.40
2/02/2024	LF 160 - 3	A	HIDROCHAN	PROYECTO	0.00	11.50
2/02/2024	LF 160 - 3	B	HIDROCHAN	PROYECTO	0.00	8.40
3/02/2024	LF 160 - 3	A	HIDROCHAN	PROYECTO	0.00	4.20
3/02/2024	LF 160 - 3	B	HIDROCHAN	PROYECTO	0.00	0.00
4/02/2024	LF 160 - 3	A	492-68	REPERFO.	0.00	0.00
4/02/2024	LF 160 - 3	B	492-68	REPERFO.	0.00	0.00
5/02/2024	LF 160 - 3	A	492-68	REPERFO.	0.00	0.00
5/02/2024	LF 160 - 3	B	492-68	REPERFO.	0.00	0.00
6/02/2024	LF 160 - 3	A	492-68	REPERFO.	0.00	0.00
6/02/2024	LF 160 - 3	B	492-68	REPERFO.	0.00	0.00
7/02/2024	LF 160 - 3	A	492-68	REPERFO.	0.00	0.00
7/02/2024	LF 160 - 3	B	492-68	REPERFO.	0.00	0.00
8/02/2024	LF 160 - 3	A	492-68	REPERFO.	0.00	0.00
8/02/2024	LF 160 - 3	B	492-68	REPERFO.	0.00	0.00
9/02/2024	LF 160 - 3	A	492-68	REPERFO.	0.00	0.00
9/02/2024	LF 160 - 3	B	492-68	REPERFO.	0.00	0.00
10/02/2024	LF 160 - 3	A	492-68	REPERFO.	0.00	0.00
10/02/2024	LF 160 - 3	B	492-68	REPERFO.	0.00	0.00
11/02/2024	LF 160 - 3	A	492-68	REPERFO.	0.00	0.00
11/02/2024	LF 160 - 3	B	492-68	REPERFO.	0.00	0.00
12/02/2024	LF 160 - 3	A	492-68	REPERFO.	0.00	0.00
12/02/2024	LF 160 - 3	B	492-68	REPERFO.	0.00	0.00
13/02/2024	LF 160 - 3	A	492-68	REPERFO.	0.00	0.00
13/02/2024	LF 160 - 3	B	492-68	REPERFO.	0.00	0.00
14/02/2024	LF 160 - 3	A	492-68	REPERFO.	0.00	0.00
14/02/2024	LF 160 - 3	B	492-68	REPERFO.	0.00	0.00
15/02/2024	LF 160 - 3	A	492-68	REPERFO.	0.00	0.00
15/02/2024	LF 160 - 3	B	492-68	REPERFO.	0.00	0.00

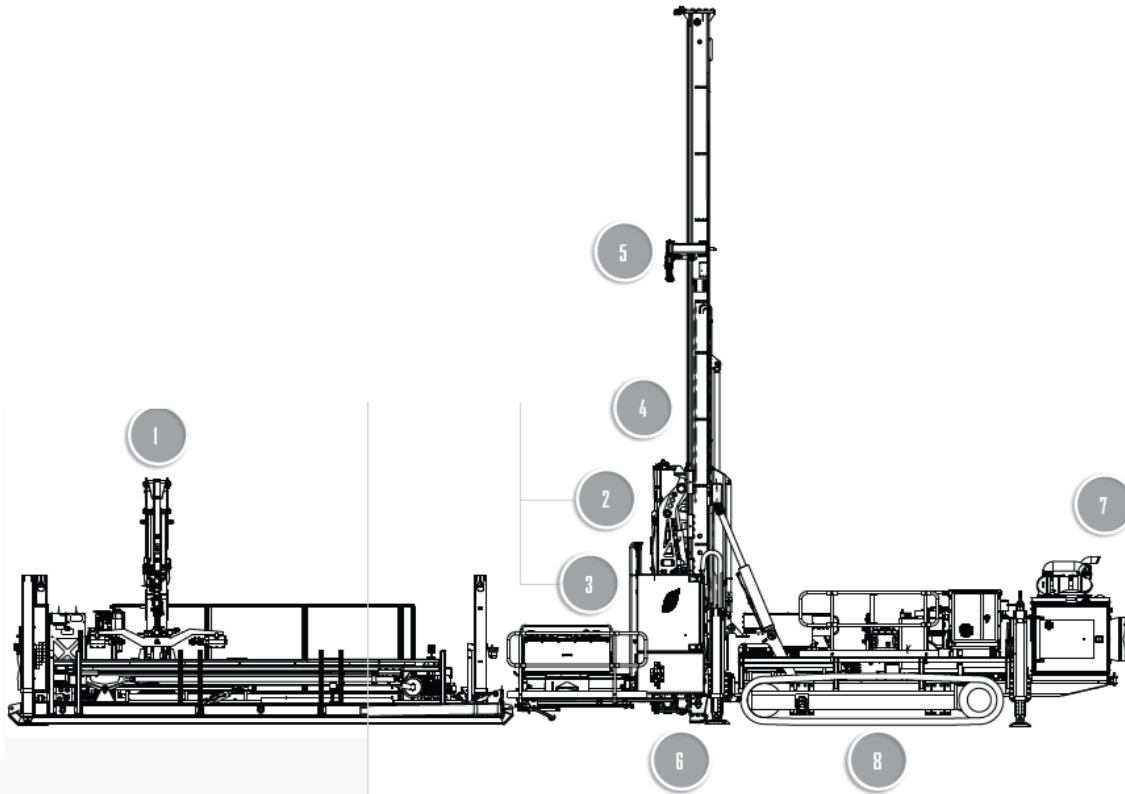
FECHA	MÁQUINA	TURNO	HOLE ID	LINEA	FROM	TO
16/02/2024	LF 160 - 3	A	492-68	REPERFO.	0.00	0.00
16/02/2024	LF 160 - 3	B	492-68	REPERFO.	0.00	0.00
17/02/2024	LF 160 - 3	A	492-68	REPERFO.	0.00	0.00
17/02/2024	LF 160 - 3	B	492-68	REPERFO.	0.00	0.00
18/02/2024	LF 160 - 3	A	492-68	REPERFO.	0.00	0.00
18/02/2024	LF 160 - 3	B	492-68	REPERFO.	0.00	0.00
19/02/2024	LF 160 - 3	A	492-68	REPERFO.	0.00	0.00
19/02/2024	LF 160 - 3	B	492-68	REPERFO.	0.00	0.00
20/02/2024	LF 160 - 3	A	492-68	REPERFO.	0.00	0.00
23/02/2024	LF 160 - 3	A	C-16A	HQ	0.00	0.00
23/02/2024	LF 160 - 3	B	C-16A	HQ	0.00	6.00
24/02/2024	LF 160 - 3	A	C-16A	HQ	6.00	9.00
24/02/2024	LF 160 - 3	B	C-16A	HQ	9.00	9.00
25/02/2024	LF 160 - 3	A	C-16A	HQ	9.00	39.00
25/02/2024	LF 160 - 3	B	C-16A	HQ	39.00	39.00
26/02/2024	LF 160 - 3	A	C-16A	HQ	39.00	39.00
26/02/2024	LF 160 - 3	B	C-16A	HQ	39.00	39.00
1/02/2024	DE-710(07)	A	HIDROCHAN	HQ	0.00	17.40
1/02/2024	DE-710(07)	B	HIDROCHAN	HQ	0.00	17.40
2/02/2024	DE-710(07)	A	HIDROCHAN	HQ	0.00	14.80
2/02/2024	DE-710(07)	B	HIDROCHAN	HQ	0.00	10.80
3/02/2024	DE-710(07)	A	HIDROCHAN	HQ	0.00	9.70
3/02/2024	DE-710(07)	B	HIDROCHAN	HQ	6.50	8.90
4/02/2024	DE-710(07)	A	HIDROCHAN	HQ	0.00	11.10
4/02/2024	DE-710(07)	B	HIDROCHAN	HQ	0.00	12.10
5/02/2024	DE-710(07)	A	HIDROCHAN	HQ	12.00	13.30
5/02/2024	DE-710(07)	B	HIDROCHAN	HQ	13.30	13.60
6/02/2024	DE-710(07)	A	HIDROCHAN	HQ	13.60	28.70
6/02/2024	DE-710(07)	B	HIDROCHAN	HQ	0.00	9.10
7/02/2024	DE-710(07)	A	HIDROCHAN	HQ	0.00	6.50
7/02/2024	DE-710(07)	B	HIDROCHAN	HQ	0.00	18.20

FECHA	MÁQUINA	TURNO	HOLE ID	LINEA	FROM	TO
8/02/2024	DE-710(07)	A	HIDROCHAN	HQ	0.00	1.45
8/02/2024	DE-710(07)	B	HIDROCHAN	HQ	1.45	5.20
9/02/2024	DE-710(07)	A	HIDROCHAN	HQ	5.20	8.00
9/02/2024	DE-710(07)	B	HIDROCHAN	HQ	8.00	9.60
10/02/2024	DE-710(07)	A	HIDROCHAN	HQ	9.60	10.10
10/02/2024	DE-710(07)	B	HIDROCHAN	HQ	10.10	10.30
11/02/2024	DE-710(07)	A	TUNEL 2	HQ	0.00	11.10
11/02/2024	DE-710(07)	B	TUNEL 2	HQ	0.00	12.20
12/02/2024	DE-710(07)	A	TUNEL 2	HQ	0.00	7.50
12/02/2024	DE-710(07)	B	TUNEL 2	HQ	0.00	11.70
13/02/2024	DE-710(07)	A	TUNEL 2	HQ	0.00	24.20
13/02/2024	DE-710(07)	B	TUNEL 2	HQ	0.00	26.40
14/02/2024	DE-710(07)	A	TUNEL 2	HQ	0.00	22.50
14/02/2024	DE-710(07)	B	TUNEL 2	HQ	0.00	19.90
15/02/2024	DE-710(07)	A	TUNEL 2	HQ	0.00	13.60
15/02/2024	DE-710(07)	B	TUNEL 2	HQ	0.00	18.80
16/02/2024	DE-710(07)	A	TUNEL 2	HQ	0.00	10.80
16/02/2024	DE-710(07)	B	TUNEL 2	HQ	0.00	10.80
17/02/2024	DE-710(07)	A	TUNEL 2	HQ	0.00	5.10
17/02/2024	DE-710(07)	B	TUNEL 1	HQ	0.00	5.25
18/02/2024	DE-710(07)	A	TUNEL 1	HQ	0.00	17.00
18/02/2024	DE-710(07)	B	TUNEL 1	HQ	0.00	13.80
19/02/2024	DE-710(07)	A	TUNEL 1	HQ	0.00	18.90
19/02/2024	DE-710(07)	B	TUNEL 1	HQ	0.00	15.00
20/02/2024	DE-710(07)	A	TUNEL 1	HQ	0.00	17.00

FECHA	MÁQUINA	TURNO	HOLE ID	LINEA	FROM	TO
20/02/2024	DE-710(07)	B	TUNEL 1	HQ	0.00	17.00
21/02/2024	DE-710(07)	A	TUNEL 2	HQ	0.00	17.00
21/02/2024	DE-710(07)	B	TUNEL 2	HQ	0.00	17.00
22/02/2024	DE-710(07)	A	TUNEL 2	HQ	0.00	20.40
22/02/2024	DE-710(07)	B	TUNEL 2	HQ	0.00	19.40
23/02/2024	DE-710(07)	A	TUNEL 2	HQ	0.00	9.00
23/02/2024	DE-710(07)	B	TUNEL 2	HQ	0.00	10.20
24/02/2024	DE-710(07)	A	TUNEL 2	HQ	0.00	22.80
24/02/2024	DE-710(07)	B	TUNEL 2	HQ	0.00	10.20
25/02/2024	DE-710(07)	A	TUNEL 2	HQ	0.00	6.80
25/02/2024	DE-710(07)	B	TUNEL 2	HQ	0.00	6.80
26/02/2024	DE-710(07)	A	TUNEL 2	HQ	0.00	6.80
26/02/2024	DE-710(07)	B	TUNEL 2	HQ	0.00	5.40
27/02/2024	DE-710(07)	A	TUNEL 2	HQ	0.00	14.80
27/02/2024	DE-710(07)	B	TUNEL 2	HQ	0.00	29.60
3/02/2024	UDX - 810 (2)	B	HIDROCHAN	HQ	0.00	0.00
4/02/2024	UDX - 810 (2)	A	HIDROCHAN	HQ	0.00	14.80
4/02/2024	UDX - 810 (2)	B	HIDROCHAN	HQ	14.80	17.80
5/02/2024	UDX - 810 (2)	A	HIDROCHAN	HQ	17.80	21.20
5/02/2024	UDX - 810 (2)	B	HIDROCHAN	HQ	21.20	31.40

Anexo 2

Equipo de perforación LFTM160 y cargador freedomtm



- Manipulación de barras totalmente con manos libres
- Cabezal pivotante
- Dispositivo de prensa
- Con certificación ce
- Línea de cable visual
- Capacidad de profundidad
- Motor de tres o cuatro niveles respetuosos con el medio ambiente
- Versatilidad de transportadores

INFORMACIÓN TÉCNICA DEL EQUIPO DE PERFORACIÓN LF™160

Capacidad de perforación*		
	Sistema métrico	EE. UU.
Testigos de diamantina BQ™/BRQ™ (La barra BQ™ se mide hasta una profundidad de 1.500 m)	2.100 m	6.900 pies
Testigos de diamantina NQ™/NRQ™/NRQ™ W-Wall™	1.800 m	5.900 pies
Testigos de diamantina HQ™/HRQ™/HRQ™ W-Wall™	1.250 m	4.100 pies
Testigos de diamantina PQ™/PHD™/PHD W-Wall™	700 m	2.300 pies

* Las cifras de esta tabla se calcularon utilizando el torque y la capacidad de tracción del cabezal con un pozo vertical lleno de líquido y una resistencia a la tracción de la roca efectiva de 5 Mpa. Los resultados de perforación reales pueden variar y serán afectados por las herramientas dentro del pozo, el nivel del líquido en el pozo, las condiciones de la subsuperficie, las técnicas de perforación, los aditivos y los equipos utilizados.

Estándares y puntos destacados del diseño de seguridad	
Estándares de diseño	EN ISO 16228
Certificación CE	Directiva de maquinaria 2006/42/EC
Manipulación de barras	Manos libres cuando se utiliza con un Cargador de barras compatible
Barrera de rotación con interbloqueo	Modo de operación restringido
Nivel de ruido	Lw(A)=122 dB / Lp(A)=89 dB
Otras características de seguridad	Todos los movimientos son controlados después de un reinicio o un cambio de Modo, Jaula de seguridad, Botones de hombre muerto, Cambios de modo, Paradas de emergencia, Prensa de barra del cabezal, Desenrosque de hilos, Alertas sonoras durante el desplazamiento y mucho más.

Motor principal		
	Sistema métrico	EE. UU.
Motor (opción)	Motor diésel Deutz TCD 6.1 L06 Turboalimentado, con refrigerador intermedio, desplazamiento de 6,1 L, 6 cilindros en línea.	
Cumplimiento de los estándares de emisiones	EU Stage IV	EPA Tier 4 Final
Combustible	Diésel	
Consumo de combustible a potencia plena	40 L/hr	10,5 gal/hr
Potencia máxima a 2.300 RPM	170 kW	231 HP
Tensión eléctrica	24 V	
Altitud máxima de operación recomendada	2.000 m	6.560 pies

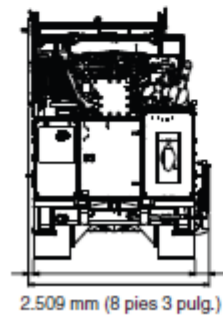
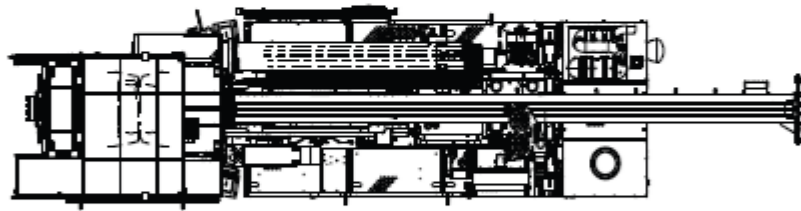
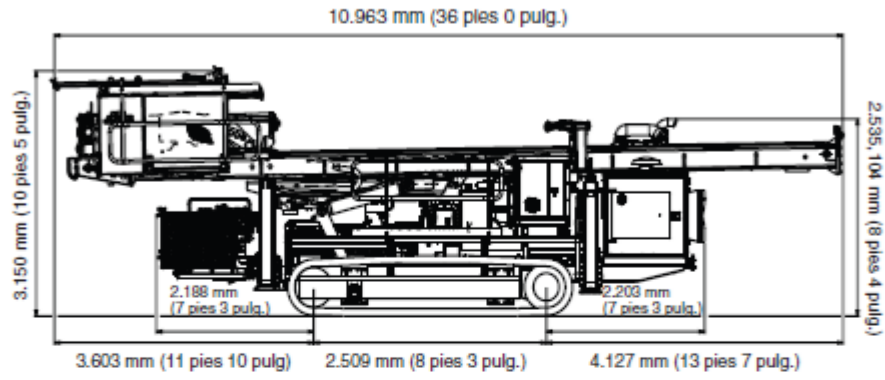
Motor principal (continuación)		
Motor (opción)	Motor diésel DEUTZ TCD 2013 L06 4V Turboalimentado, con refrigerador intermedio, desplazamiento de 7,2 L; 6 cilindros en línea.	
Cumplimiento de los estándares de emisiones	EU Stage IIIA	EPA Tier 3
Combustible	Diésel	
Consumo de combustible a plena potencia	55 L/hr	14,5 gal/hr
Potencia máxima a 2.000 RPM	227 kW	304 HP
Tensión eléctrica	24 V	
Altitud máxima de operación recomendada	4.500 m	14.760 pies
Capacidad del tanque de combustible	500 L	132 gal

Motor principal (continuación)		
Motor (opción)	Motor diésel CUMMINS QSB 6.7 Turboalimentado, con refrigerador intermedio, desplazamiento de 6,7 L; 6 cilindros en línea.	
Cumplimiento de los estándares de emisiones	EU Stage IV	EPA Tier 4 final
Combustible	Diésel	
Consumo de combustible a plena potencia	48.5 L/hr	12.8 gal/hr
Potencia máxima a 2.000 RPM	194 kW	264 HP
Tensión eléctrica	24 V	
Altitud máxima de operación recomendada	3,300 m	10,800 pies
Capacidad del tanque de combustible	500 L	132 gal

Sistema hidráulico		
	Sistema métrico	EE. UU.
Bomba primaria	pistón axial con sistema LS y regulación de presión máxima	
Flujo máximo, Q1	250 L/min	66 gal/min
Flujo máximo, Q2	195 L/min	51 gal/min
Presión máxima	300 bar	4.300 lb/pulg ²
Bombas auxiliares	Bombas de marchas 2 x	
Flujo Q3	43 L/min	11,3 gal/min
Flujo Q4	36 L/min	9,5 gal/min
Capacidad del tanque de aceite hidráulico	600 L	158 gal
PTO1	35 L/min a 200 bar	9,25 gal/min a 2.900 lb/pulg ²

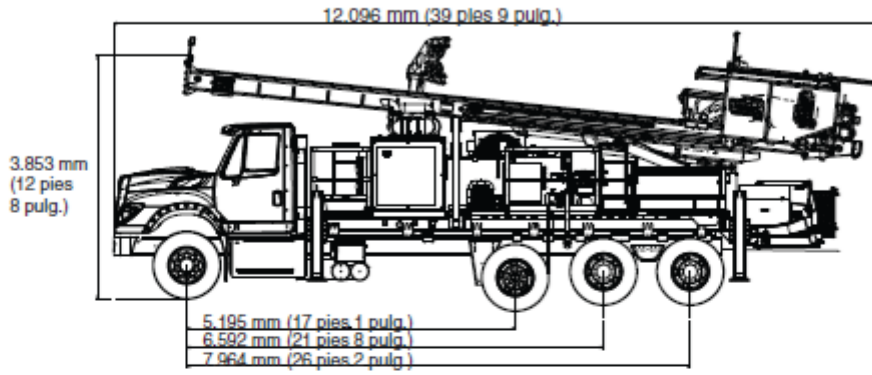
Medidas

Montaje en orugas - Transporte en la calle



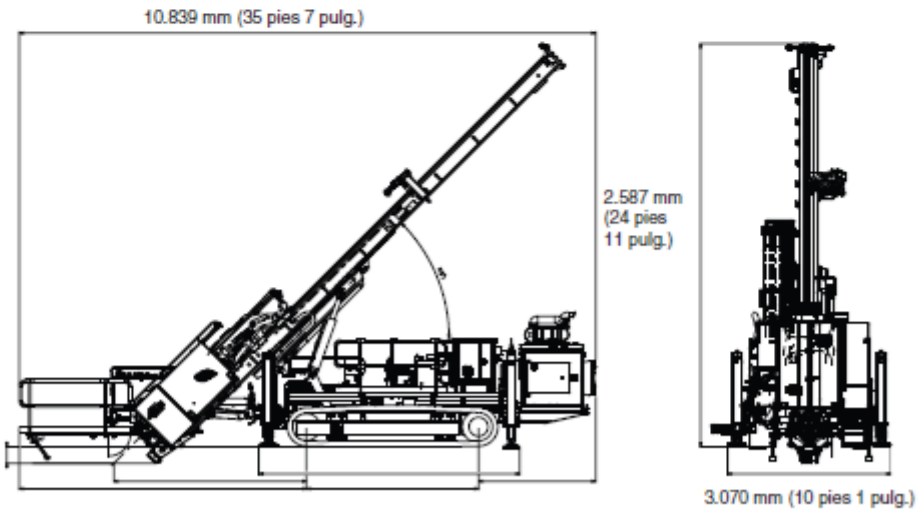
Medidas

Montaje en camión - Transporte (Internacional)



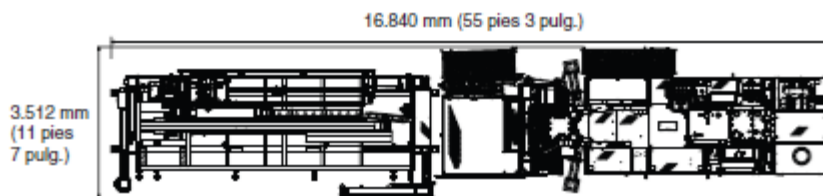
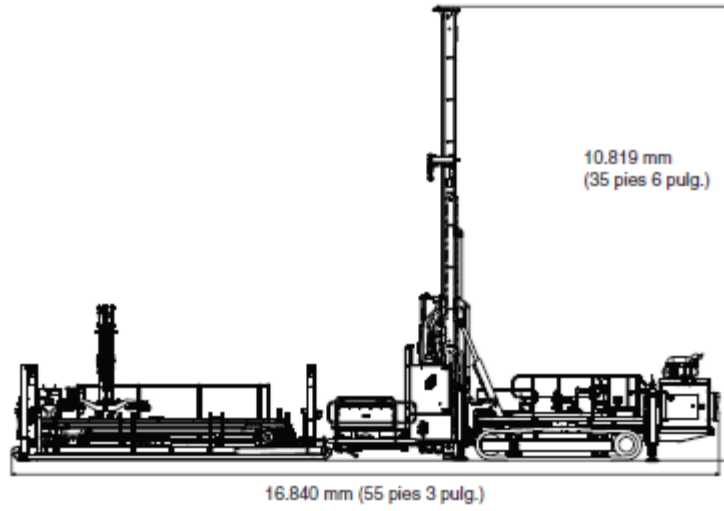
Medidas

Perforación a 45°



Medidas

Perforación en mástil de 90° en la posición más baja con cargador FREEDOM™



Anexo 3

Sandvik HL710 Hydraulic Rock Drill



SANDVIK HL710 HYDRAULIC ROCK DRILL

TECHNICAL SPECIFICATION

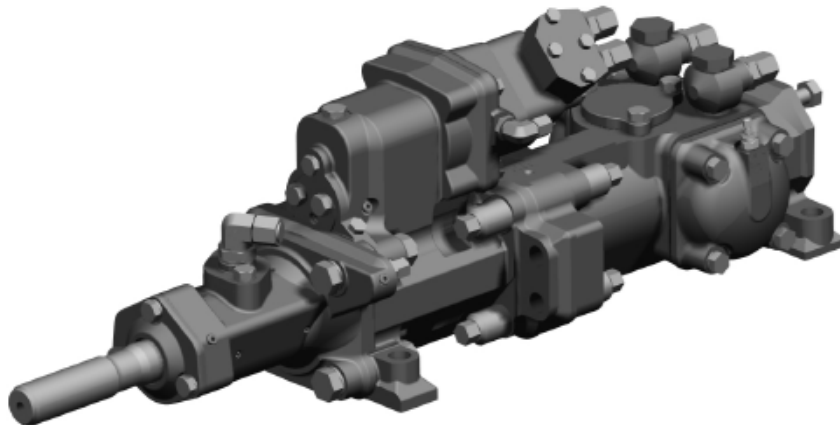
Sandvik HL710 hydraulic rock drill is designed for long hole drilling of 64 - 115 mm diameter holes. It is used in Sandvik underground production and surface drill rigs.

Sandvik HL710 is a heavy hydraulic percussive rock drill with independent rotation and separate flushing. High drilling capacity and reliability is achieved through functional modules.

Three rotation motor type options are available for torque/speed adjustment. The design is covered by several patents.

KEY FEATURES

Hole diameter drilling	64 - 115 mm
Power class	19.5 kW
Percussion rate	42 - 52 Hz
Operating pressure	
Percussion	100 - 190 bar
Rotation (max.)	200 bar
Rotation motor type	OMT 200, OMT 250 or OMT 315
Drill steels	38 mm 45 mm 51 mm
Shanks	
38 mm rods	T38 / 600
45 mm rods	T45 / 600
51 mm rods	T51 / 600
Weight	245 kg



ROTATION MECHANISM

Motor	Orbit type
Motor type 1	OMT 200
Torque (at 175 bar)	1 095 Nm
Rotation speed	0 - 180 rpm
Flow (at max speed)	79 l/min

ROTATION MECHANISM

Motor	Orbit type
Motor type 2	OMT 250
Torque (at 175 bar)	1 335 Nm
Rotation speed	0 - 180 rpm
Flow (at max speed)	99 l/min

ROTATION MECHANISM

Motor	Orbit type
Motor type 3	OMT 315
Torque (at 175 bar)	1 765 Nm
Rotation speed	0 - 180 rpm
Flow (at max speed)	128 l/min

FLUSHING PRESSURE

Max. pressure (air / water)	20 bar
-----------------------------	--------

ACCUMULATORS

Accumulator gas	Nitrogen N2
High pressure (HP)	50 bar
Low pressure (LP)	4 bar
Filling valve	Vg8 DIN7756

SHANK LUBRICATION

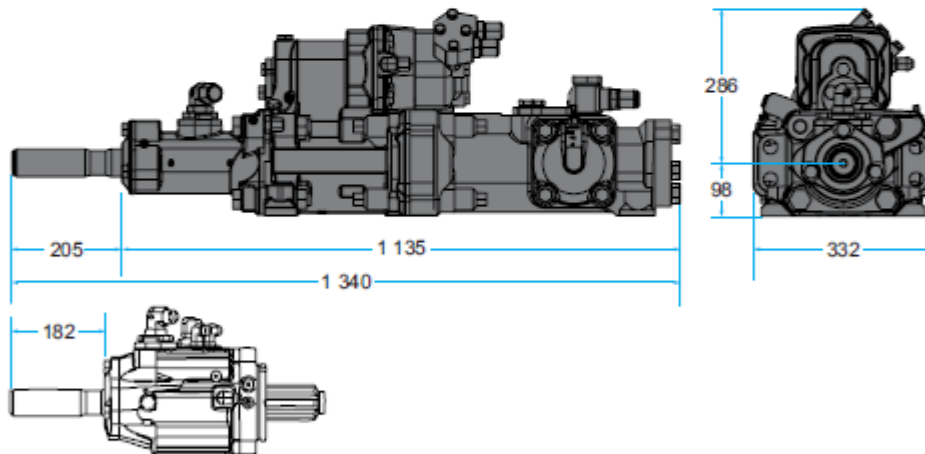
Air flow	200 - 300 l/min
Pressure	4 - 7 bar
Oil consumption	250 - 550 g/h

OIL RECOMMENDATION

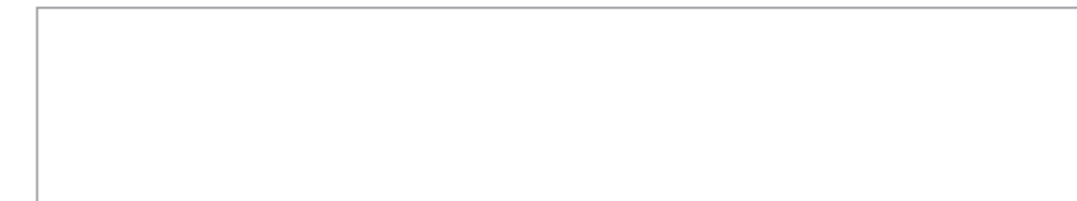
Oil operating temperature	+40°C up to +60°C
Oil recommendation	See Sandvik drill rigs lubricant recommendation for detailed information

OPTION

Special tools for HL710 / Complete set	ID 150 730 78
Special tools for HL710 / Field tools set	ID 150 734 88
Power extractor	See separate specification



All dimensions in mm



Sandvik Mining reserves the right to make changes to the information on this data sheet without prior notification to users. Please contact a Sandvik representative for clarification on specifications and options.

Anexo 4

LM™90 Underground Coring Drill

LM™90 TECHNICAL INFORMATION

Drill Depth Guidelines						
Drill Rod/Core Barrel	Hole Depth			Hole Depth		
	Metric			U.S.		
	Up	Horizontal	Down	Up	Horizontal	Down
ARQTK*	820	1500	1500	2700	4920	4920
BQ	430	1500	1350	1430	4920	4440
NQ	260	1190	990	870	3900	3260
HQ	130	610	610	430	2000	2010
Note	Depth capacity includes allowance for force required to break core using 10 MPa rock strength					
***	ARQ™TK capacity shown for comparison purposes only. It is not recommended drilling practice to drill over 1500 m ARQ™TK depth					

Drill Depth Guidelines with Cylinder Reversed				
Drill Rod/Core Barrel	Hole Depth		Hole Depth	
	Metric		U.S.	
	Up		Up	
AQTK™	1500		4920	
BQ™	930		3060	
NQ™	620		2050	
HQ™	360		1200	
Note	Depth capacity includes allowance for force required to break core using 10 MPa rock strength			

Drill Specification:		
Feed Frame (1300 Series)	Metric	U.S.
Feed Stroke	1830 mm	72 in
Max. rated pushing force	63.56 kN @ 28 MPa	14289 lbf @ 4061 psi
Max. rated pulling force	127.69 kN @ 28 MPa	28706 lbf @ 4061 psi
Rated carriage speed	0.70 m/s per complete cycle	3 ft/s per complete cycle
Normal rod handling speed	Approximately 15 n/min.*	Approximately 50 ft/minute*
Note	The feed frame is reversible	
***	Actual rod handling speed may vary with working conditions	

LM™90 TECHNICAL INFORMATION

Hydrostatic Pumps		
Main Pump	Metric	U.S.
Type	Variable displacement, axial piston w/pressure compensated load sensing control	
Manufacturer	Rexroth (Hydromatik Gmbh)	
Operating conditions as used on LM90™ drill: Maximum pressure	31 MPa, forward rotation, reverse rotation, rod handling	4500 PSI, forward rotation, reverse rotation, rod handling
Recirculation pump	Oil cooling and charge pump	
Type	Gear, fixed displacement	
Manufacturer	Rexroth (Hydromatik Gmbh)	
Maximum pressure operating conditions as used on LM90™ drill	1-1.5 Bar	14.5-21.8 psi
Normal speed	1490 RPM @ 50 Hz 1790 RPM @ 60 Hz	
Hydraulic tank volume	60 L	15.8 Gal

Wireline Hoist (optional)		
	Metric	U.S.
Type	All hydraulic, with proportional spooling control power up, power down, hydraulically locked in neutral free wheel override, chain driven spooling device	
Line Pull		
Bare Drum	11.77 kN	2649 lb
Full Drum	4.51 kN	1015 lb
Line Speed		
Bare Drum	0 - 100 m/min	328 ft/min
Full Drum	0 - 254 m/min	833 ft/min
Drum Capacity		
5 mm	1400 m	4600 ft
6 mm	1000 m	3280 ft
1/4"	895 m	2930 ft

DIMENSIONS AND WEIGHTS

Feed Frame (1300 Series)	
<p>Feed Frame Weight: 1520 kg (3344 lbs)</p> <p>Rotation Unit w/chuck Weight: 235 kg (517 lbs)</p> <p>PQ™ Rod Clamp Assembly Weight: 170 kg (374 lbs)</p> <p>a = 698 mm (27.50 in) b = 851 mm (33.50 in) c = 4894 mm (193 in) Working length 6410 mm (252.50 in) Working length fully extended d = 4108 mm (162.75 in)</p>	
Control Panel	
<p>Weight: 46 kg (101 lbs) w/o hoses Add 42 kg (92 lbs) for hoses</p> <p>a = 575 mm (23 in) b = 521 mm (20.50 in) c = 480 mm (19 in)</p>	
Power Pack	
<p>Weight: 1520 kg (3344 lbs) Includes electric motor and starter, but without towing group</p> <p>a = 1318 mm (52 in) b = 730 mm (29 in) c = 1526 mm (60 in) d = 1033 mm (41 in) e = 3893 mm (153.25 in) f = 2230 mm (87.75 in)</p>	