

Universidad Nacional de Ingeniería
Facultad de Ingeniería Geológica Minera y Metalúrgica



TESIS

**Optimización de los metros perforados de producción mediante
la asignación de operadores polifuncionales aplicando
programación lineal entera, en una mina de cobre a tajo abierto**

Para obtener el título profesional de Ingeniero de Minas.


Elaborado por

Horacio Jesús Prado García

 0009-0006-8530-0863

Asesor

Dr. Jimmy Aurelio Rosales Huamani

 0000-0002-3737-8694

LIMA – PERÚ

2023

Citar/How to cite	Prado García [1]
Referencia/Reference	[1] H. Prado García, <i>“Optimización de los metros perforados de producción mediante la asignación de operadores polifuncionales aplicando programación lineal entera, en una mina de cobre a tajo abierto”</i> [Tesis de pregrado]. Lima (Perú): Universidad Nacional de Ingeniería, 2023.
Estilo/Style:	
IEEE (2020)	

Citar/How to cite	(Prado, 2023)
Referencia/Reference	Prado, H. (2023). <i>Optimización de los metros perforados de producción mediante la asignación de operadores polifuncionales aplicando programación lineal entera, en una mina de cobre a tajo abierto</i> . [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio institucional Cybertesis UNI.
Estilo/Style:	
APA (7ma ed.)	

Dedicatoria

Querida familia, mentores y amigos,

Este logro no habría sido posible sin su apoyo y orientación constante. Agradezco su paciencia, dedicación y confianza en mí durante este largo camino hacia la culminación de mi tesis. Cada uno de ustedes ha dejado una huella duradera en mi vida y en mi carrera académica.

A mi familia, gracias por ser mi apoyo incondicional en todo momento. A mis amigos, gracias por las risas, la motivación y el aliento constante. A mis mentores, gracias por su experiencia, sabiduría y la oportunidad de trabajar bajo su guía.

¡Gracias por ayudarme a llegar hasta aquí!

Resumen

La presente tesis titulada "Optimización de los metros perforados de producción en minas de cobre a tajo abierto mediante operadores polifuncionales y programación lineal entera" explora la optimización de la asignación de operadores multifuncionales en minas de cobre a tajo abierto, con el fin de aumentar la producción. Central en este estudio es un modelo de Programación Lineal Entera (PLE), diseñado específicamente teniendo en cuenta las características y restricciones operativas propias de la mina.

Con base en una meticulosa recopilación de datos de la mina, que incluyen información sobre las competencias de los operadores, el equipamiento de perforación, la producción existente y las limitantes operativas, se estructuró el modelo PLE. Este modelo integra una función objetivo que aspira a maximizar la producción de metros perforados, junto con las restricciones del sistema minero. Para resolver este complejo modelo, se empleó software avanzado de optimización. Además, se implementó un detallado análisis de sensibilidad, para evaluar cómo variaciones en los parámetros pueden influir en la solución óptima y determinar posibles áreas de mejora.

Los hallazgos del estudio resaltan que, al incorporar programación lineal entera en la asignación de roles multifuncionales, se logra una notable mejora en la producción de minas de cobre a tajo abierto. Esta estrategia, al maximizar eficientemente los recursos disponibles, se postula como una herramienta invaluable para decisiones en el ámbito minero, promoviendo una mayor eficiencia y rentabilidad en la industria.

Palabras claves — Optimización, metros perforados de producción, asignación de operadores, programación lineal entera (PLE), mina de cobre a tajo abierto, restricciones operativas, eficiencia, gestión de minas, recursos humanos y materiales.

Abstract

The present thesis titled "Optimization of drilled meters of production in open-pit copper mines through multifunctional operators and integer linear programming" delves into the enhancement of the assignment of multifunctional operators in open-pit copper mines, aiming to boost production. Central to this study is an Integer Linear Programming (ILP) model, specifically designed considering the mine's unique operational features and constraints.

Based on a meticulous data collection from the mine, which encompasses information about the operators' skills, drilling equipment, existing production, and operational limits, the ILP model was structured. This model incorporates an objective function aiming to maximize the production of drilled meters, along with the mine system's constraints. Advanced optimization software was employed to solve this intricate model. Furthermore, a detailed sensitivity analysis was implemented to assess how variations in the parameters might influence the optimal solution and pinpoint potential areas for improvement.

The study's findings highlight that, by integrating integer linear programming into the assignment of multifunctional roles, a significant improvement in the production of open-pit copper mines is achieved. This strategy, efficiently maximizing available resources, stands out as an invaluable tool for decisions in the mining realm, fostering greater efficiency and profitability in the industry.

Keywords — Optimization, production drilling meters, operator allocation, integer linear programming (ILP), open-pit copper mine, operational constraints, efficiency, mine management, human and material resources.

Tabla de Contenido

	Pág.
Resumen	iv
Abstract	v
Introducción	xi
Capítulo I. Parte introductoria del trabajo	1
1.1. Antecedentes referenciales	1
1.1.1. Antecedentes a nivel nacional	1
1.1.2. Antecedentes a nivel internacional	5
1.2. Planteamiento de la realidad problemática.....	6
1.3. Objetivos	7
1.3.1. Objetivos generales	7
1.3.2. Objetivos específicos	7
1.4. Hipótesis	8
1.4.1. Hipótesis general	8
1.4.2. Hipótesis específica	8
Capítulo II. Marco teórico y conceptual	9
2.1. Marco teórico	9
2.1.1. Perforadoras rotativas	9
2.1.2. Factores que afectan la velocidad de perforación.....	33
2.1.3. Influencia de los operadores en la velocidad de perforación.....	36
2.1.4. Programación lineal entera (PLE)	37
2.2. Marco conceptual.....	40
2.2.1. Programación lineal entera:	40
2.2.2. Mina de cobre a tajo abierto	41
2.2.3. Operadores polifuncionales	41
2.2.4. Productividad.....	41
2.2.5. Optimización.....	41

2.2.6.	Restricciones y criterios de asignación	41
2.3.	Hipótesis y operacionalización de variables	42
2.3.1.	Hipótesis.....	42
2.3.2.	Operacionalización de variables	42
2.4.	Metodología de la investigación	43
2.4.1.	Tipo y diseño de investigación.....	43
2.4.2.	Unidad de análisis	43
2.4.3.	Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	46
2.4.4.	Procedimiento de investigación	47
2.4.5.	Matriz de consistencia	48
Capítulo III. Desarrollo del trabajo de investigación		50
3.1.	Recolección de datos.....	50
3.1.1.	Diagnóstico de la flota de perforación.....	50
3.1.2.	Diagnóstico de la clasificación de los tipos de roca.....	51
3.1.3.	Diagnóstico de la disponibilidad, uso de disponibilidad y eficiencia operativa...	52
3.1.4.	Diagnóstico de la velocidad de perforación.....	56
3.1.5.	Diagnóstico del plan de perforación.....	56
3.2.	Procesamiento de la información	57
3.2.1.	Procesamiento de la velocidad de perforación.....	57
3.2.2.	Procesamiento de la disponibilidad, utilización y eficiencia operativa de las perforadoras rotativa.....	57
3.2.3.	Procesamiento del plan de perforación.....	58
3.3.	Análisis de los metros perforados por los perforistas	59
3.3.1.	Propuesta de modelo de programación lineal entera	59
3.3.2.	Análisis de sensibilidad en función del ausentismo de personal	63
Capítulo IV. Análisis y discusión de resultados		65
4.1.	Análisis descriptivos de la investigación.....	65
4.2.	Prueba de hipótesis de la investigación	65

4.2.1. Hipótesis general.....	65
4.2.2. Hipótesis secundarias.....	67
4.3. Impacto económico del incremento de metros perforados	70
Conclusiones	71
Recomendaciones	72
Referencias bibliográficas.....	73
Anexos	1

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1: Matriz de consistencia.....	49
Tabla 2: Equipos de Perforación.....	50
Tabla 3: Rangos de UCS según la dureza.....	51
Tabla 4: Modelo de tiempos de la mina de cobre.....	52
Tabla 5: Promedio de la velocidad de perforación por dureza de roca.....	57
Tabla 6: Indicadores de operativos.....	58
Tabla 7: Distribución de tipos de dureza de roca.....	58
Tabla 8: Metros estimados de perforación.....	59
Tabla 9: Operadores seleccionados (40) para maximizar la función Objetivo.....	61
Tabla 10: Distribución de operadores según modelo de perforadora.....	62
Tabla 11: Escenarios optimizados de metros perforados considerando el ausentismo...	64
Tabla 12: Metros estimados y metros optimizados.....	66
Tabla 13: Incremento de metros perforados.....	68
Tabla 14: Variación del costo unitario de perforación US\$/metro.....	70

Lista de Figura

	Pág.
Figura 1: Representación esquemática que indica los componentes clave de una perforadora.....	9
Figura 2: Funciones realizadas por la máquina perforadora.....	11
Figura 3: Equipo de perforación Sandvik D90KS con el mástil posicionado para perforar taladros inclinados en una mina australiana	16
Figura 4: Perforadora rotativa de taladros de voladura CAT MD6640	20
Figura 5: Vista General de la perforadora MD6640	21
Figura 6: Perforadora rotativa de taladros de voladura PV 351D	22
Figura 7: Componentes principales de la perforadora rotativa PV 351D	23
Figura 8: Perforadora rotativa para taladros de voladura modelo 320XPC.....	24
Figura 9: Plano de cubierta de la perforadora 320XPC	25
Figura 10: Minerales con valor económico.....	46
Figura 11: Formula de Preillet para calcular la velocidad de penetración.....	51
Figura 12: Estadísticos descriptivos de la profundidad del taladro y el tiempo de perforación	65
Figura 13: Resultados de la prueba de T de Stunt de los metros perforadoras estimado y optimizados	67
Figura 14: Resultados del Análisis de Varianza de los metros perforados por mes	69

Introducción

La industria minera desempeña un papel fundamental en el desarrollo económico de muchos países, y la extracción de minerales, como el cobre, es una actividad crucial en este sector. En las minas a tajo abierto, donde se lleva a cabo la explotación a gran escala, es esencial maximizar la producción de metros perforados para lograr una operación eficiente y rentable.

La asignación adecuada de los operadores polifuncionales, encargados de realizar las tareas de perforación, juega un papel vital en la productividad de la mina. Sin embargo, esta asignación puede ser un desafío debido a la complejidad de los factores a considerar, como las habilidades y funciones de los operadores, las características de las perforadoras, las restricciones operativas y las condiciones cambiantes en el entorno minero.

En este contexto, la presente tesis tiene como objetivo abordar el problema de la asignación eficiente de operadores polifuncionales en una mina de cobre a tajo abierto, con el propósito de optimizar la producción de metros perforados. Para lograr este objetivo, se aplicará un enfoque basado en la programación lineal entera, que permitirá formular y resolver un modelo matemático que considere las restricciones y características operativas específicas de la mina en estudio.

El desarrollo de un modelo de programación lineal entera ofrecerá una metodología rigurosa y sistemática para optimizar la asignación de los operadores polifuncionales, teniendo en cuenta factores como la dureza de la roca, velocidad de perforación, profundidad de los taladros, disponibilidad de los operadores y las perforadoras, así como las restricciones operativas y de ausentismo.

Para llevar a cabo esta investigación, se recopilarán datos relevantes sobre la mina, los operadores polifuncionales, las perforadoras y las restricciones operativas, utilizando diversas técnicas de recolección de datos, como la revisión documental, entrevistas con personal clave y observación directa de las operaciones mineras. Estos datos serán

fundamentales para desarrollar el modelo de programación lineal entera y resolverlo utilizando software de optimización.

Se analizarán los resultados obtenidos y se realizará un análisis de sensibilidad para evaluar cómo los cambios en los parámetros afectan la solución óptima y para identificar posibles mejoras en la asignación de recursos. Con base en el análisis de resultados, se elaborarán conclusiones y recomendaciones que contribuirán a mejorar la eficiencia y rentabilidad de las operaciones mineras en minas de cobre a tajo abierto.

Se espera que esta investigación proporcione una herramienta valiosa para la toma de decisiones en la gestión de minas, permitiendo una asignación óptima de los operadores polifuncionales y una mejora significativa en la producción de metros perforados. Además, se espera que los hallazgos y las recomendaciones de esta tesis contribuyan al avance del conocimiento y la práctica en la industria minera, impulsando la eficiencia y la rentabilidad en este sector tan importante para el desarrollo económico.

Capítulo I. Parte introductoria del trabajo

1.1. Antecedentes referenciales

1.1.1. *Antecedentes a nivel nacional*

Respecto a los trabajos realizados sobre perforación en minería tenemos:

En el trabajo de Cuenca, C. M. (2012), sobre Método para reducción de costos de perforación. En este estudio se demostró que el ahorro en los costos de perforación no solo pasa por los precios sino también por el óptimo rendimiento de los accesorios en otros términos mayor vida útil. Asimismo, la sobre perforación genera demoras en la operación puesto que disminuye la velocidad de penetración incrementando los costos al dañar la columna de perforación y la perforadora.

En el trabajo de Cáceres, R. A. (2012), sobre Aplicación de alta precisión en la perforación de mallas de producción en Cía. Minera Yanacocha SRL. En este estudio se demostró que la aplicación de la alta precisión en la perforación de mallas reduce la sobreperforación, disminuye el tiempo de desplazamiento de taladro a taladro, mejora la geometría de la malla de perforación, lo cual permite ampliar la malla de perforación.

En el trabajo de Mendoza, A. (2012), sobre Reducción de costos mediante la optimización de parámetros de perforación y voladura caso: Minaspampa. En este estudio se demostró que a través de una nueva malla de perforación y de carga en mineral se logró minimizar los costos en la perforación y voladura en la CIA. Minaspampa, con esta nueva configuración se obtuvo un ahorro significativo en metros de perforación y consumo de mezclas de explosivo (ANFO), reduciendo en un 20%.

En el trabajo de Vásquez, D. M. (2015), sobre Mejora en el proceso de perforación y voladura - Unidad Cerro Verde. En este estudio se demostró que las pruebas de aire y Pulldown en las perforadoras son muy importantes para el óptimo desempeño del proceso de perforación.

Los cuatro trabajos presentan soluciones innovadoras para optimizar la velocidad de perforación en operaciones mineras de cobre a tajo abierto. Todos ellos destacan la

importancia de la precisión en la perforación y la optimización de los parámetros para reducir costos y mejorar la eficiencia en las operaciones.

El trabajo de Cuenca, C. M. (2012) muestra la importancia de la vida útil de los accesorios de perforación, lo cual es un factor importante que considerar en la reducción de costos en las operaciones mineras. Además, destaca la necesidad de evitar la sobreperforación, ya que esta puede generar demoras y aumentar los costos debido al daño en la columna de perforación y la perforadora.

El estudio de Cáceres, R. A. (2012) destaca la importancia de la alta precisión en la perforación de mallas de producción para reducir la sobreperforación, mejorar la geometría de la malla de perforación y disminuir el tiempo de desplazamiento de taladro a taladro. Esto puede ser especialmente útil en operaciones mineras con mallas de producción complejas y extensas.

El trabajo de Mendoza, A. (2012) destaca la importancia de una nueva configuración de malla de perforación y carga en mineral para minimizar los costos en la perforación y voladura. Esta nueva configuración logró un ahorro significativo en metros de perforación y consumo de mezclas de explosivo (ANFO), lo cual puede ser especialmente útil en operaciones mineras con grandes volúmenes de mineral a procesar.

Finalmente, el estudio de Vásquez, D. M. (2015) destaca la importancia de los test de aire y Pulldown en las perforadoras para el óptimo desempeño del proceso de perforación y voladura. Estos tests pueden ayudar a identificar y solucionar problemas de la perforadora antes de que se conviertan en problemas mayores y costosos.

En conclusión, todos estos trabajos muestran que la optimización de la velocidad de perforación es un factor crítico en la eficiencia y reducción de costos en las operaciones mineras de cobre a tajo abierto. Además, todos destacan la importancia de la precisión en la perforación y la optimización de los parámetros para lograr estos objetivos.

Respecto a la aplicación de Programación Lineal en minería se tienen los siguientes trabajos:

En el trabajo de Túpac-Yupanqui, D. D. (2012), sobre la Homogenización de la ley de cabeza del mineral aplicando programación lineal. En este estudio se demostró que la homogenización del mineral de cabeza aplicando programación lineal, ayuda a mantener la recuperación metalurgia en sus niveles programados, maximizando la utilidad.

En el trabajo de Bernal, C. (1979), sobre la aplicación de programación lineal en minería a cielo abierto. En este estudio que los modelos de programación Lineal son bastantes útiles en asistir a la administración de la mina a programar científicamente sus operaciones mineras ya sea maximizando ganancias o minimizando costos. Asimismo, el análisis de sensibilidad es de gran importancia en la toma de decisiones a nivel gerencias, dando un rango bajo el cual la solución definida con la programación lineal es válida.

En el trabajo de Cortijo, J. M. (1987), sobre la Optimización del plan de producción y control de calidad del mineral utilizando un modelo de programación lineal. Se demostró que los modelos matemáticos pueden ser aplicables en las diversas fases de la industria minera. Tanto para optimizar las operaciones como en el planeamiento de minado o en la optimización del transporte, lo cual es una herramienta de decisión.

Los tres trabajos mencionados tienen en común el uso de modelos matemáticos, en particular la programación lineal, para mejorar la eficiencia y rentabilidad en la industria minera.

El trabajo de Túpac-Yupanqui, D. D. (2012) muestra cómo la programación lineal puede ser utilizada para homogenizar la ley de cabeza del mineral, lo que a su vez contribuye a mantener la recuperación metalúrgica en los niveles programados y maximizar la utilidad. Este enfoque es importante ya que la calidad del mineral puede variar significativamente en una mina, y la homogenización puede mejorar el proceso de producción.

El trabajo de Bernal, C. (1979) destaca que la programación lineal es útil para asistir a la administración de la mina en la programación científica de sus operaciones mineras, ya sea para maximizar ganancias o minimizar costos. Además, el análisis de sensibilidad

es crucial en la toma de decisiones a nivel gerencial, ya que permite determinar el rango en el que la solución definida con la programación lineal es válida.

Finalmente, el trabajo de Cortijo, J. M. (1987) demuestra cómo los modelos matemáticos pueden ser aplicables en diversas fases de la industria minera, como el planeamiento de minado y la optimización del transporte, lo que puede mejorar significativamente la eficiencia en estas áreas.

En resumen, estos trabajos ilustran cómo la programación lineal y otros modelos matemáticos pueden ser utilizados en la industria minera para mejorar la eficiencia, rentabilidad y toma de decisiones informada.

Respecto a la asignación de recursos se tienen los siguientes trabajos:

En el trabajo de Vásquez, J. A. (2008), sobre Elaboración de un método para optimizar la asignación de tripulación o itinerarios de vuelos para las aerolíneas. En este estudio se demostró que los pasos establecidos por el método de asignación propuesto mediante la descomposición en redes parciales proporcionando una estrategia para solucionar el problema de asignación de tripulación, posibilitando la descomposición del colosal problema inicial en sub partes pseudo independientes, lo cual facilita el tratamiento de cada versión reducido por algoritmos convencionales (modelos de búsqueda, algoritmos genéticos y programación lineal) que sean de libre consideración.

En el trabajo de León, Y. I. (2002), sobre Optimización en problemas de asignación de recursos y tareas usando computación evolutiva y multiagentes inteligentes. En este estudio se demostró que la solución a problemas de asignación de recurso y tareas implican una reducción de costos al optimizar el uso de los recursos disponibles cumpliendo las demandas de los clientes y de esta manera el servicio.

Ambos trabajos abordan el problema de asignación de recursos, pero desde diferentes enfoques.

El trabajo de Vásquez, J. A. (2008) propone un método para optimizar la asignación de tripulaciones o itinerarios de vuelos para aerolíneas utilizando la descomposición en redes parciales. Este enfoque permite descomponer un problema complejo en partes más

manejables y encontrar soluciones óptimas a cada una de ellas. Además, se utilizan diferentes algoritmos convencionales para encontrar soluciones a las subpartes, lo que permite adaptar el enfoque a diferentes necesidades y restricciones.

Por otro lado, el trabajo de León, Y. I. (2002) propone utilizar la computación evolutiva y los multiagentes inteligentes para optimizar la asignación de recursos y tareas, con el objetivo de reducir los costos y mejorar el servicio al cliente. Este enfoque se basa en la simulación de procesos biológicos para encontrar soluciones óptimas a problemas complejos, lo que permite una mayor flexibilidad y adaptabilidad a diferentes escenarios.

En ambos casos, se demuestra que la optimización de la asignación de recursos puede generar importantes beneficios, ya sea en términos de costos o de mejora del servicio al cliente. Sin embargo, cada enfoque presenta diferentes ventajas y limitaciones, por lo que es importante seleccionar la estrategia más adecuada para cada caso particular.

1.1.2. Antecedentes a nivel internacional

En el trabajo de Rodríguez, E. Z. (2006), sobre asignación multicriterio de tareas a trabajadores polivalentes. En este estudio se comprobó las ventajas que suponen la utilización de personal totalmente polivalente, ya que aumenta la capacidad disponible que puede ser asignada en cada una de las tareas y es una pieza clave para el uso de la flexibilidad, así como también el poder asignar más de una tarea a una persona a la vez, siempre y cuando sea permitido por la naturaleza de tareas que se están asignando, distribuyendo al personal en las diferentes tareas conforme a sus necesidades y las características del personal del que dispone.

El trabajo de Rodríguez, E. Z. (2006) es un estudio sobre asignación multicriterio de tareas a trabajadores polivalentes. En este trabajo se presenta una estrategia para asignar tareas a un grupo de trabajadores con habilidades diversas, de manera que se cumplan ciertos criterios y objetivos, como la maximización de la utilización del personal y la minimización de los costos.

Una de las principales ventajas de la asignación de tareas a trabajadores polivalentes es que aumenta la capacidad disponible y mejora la flexibilidad. Además, al

asignar más de una tarea a una persona, se puede distribuir al personal de manera más eficiente, considerando sus habilidades y necesidades.

El enfoque propuesto en este estudio utiliza técnicas multicriterio para evaluar las diferentes alternativas de asignación de tareas y seleccionar la mejor opción, considerando factores como la capacidad de los trabajadores, los requisitos de las tareas y los costos asociados.

En general, el trabajo de Ericka Zulema Rodríguez Calvo (2006) demuestra la importancia de considerar la polivalencia del personal y la necesidad de utilizar técnicas adecuadas para la asignación de tareas en entornos complejos y dinámicos. Este enfoque puede ser aplicado en diferentes contextos, como la gestión de proyectos y la planificación de recursos humanos en empresas y organizaciones.

1.2. Planteamiento de la realidad problemática

La empresa minera modelo es una compañía cuprífera calificada como gran productor minero. Sin embargo, por la coyuntura actual que atraviesa la empresa por paralizaciones se requiere incrementar el tonelaje volado de la mina para incrementar la producción de tonelaje movido. En tal sentido, desde la operación unitaria de perforación se requiere incrementa los metros perforados con la finalidad de incrementar la producción.

Por lo cual se ha identificado que la asignación de perforista se realiza en base a la experiencia de los supervisores, asimismo se ha detectado que la productividad de los perforistas esta desbalanceada entre las diferentes guardias de trabajo. La productividad en términos de cantidad de metros perforados por guardia se trabaja dentro de un sistema organizado en el cual la gerencia y la supervisión desempeñan un papel fundamental. Además, se trabaja con operadores que tienen diferentes valores, actitudes e intereses y manejan u operan máquinas.

Los operadores deben interactuar diariamente con las perforadoras; con las condiciones del terreno, disponibilidad mecánica, su antigüedad y estado de conservación, mantenimiento programado, entre otros factores. También se considera el tren de

perforación, las comodidades de la cabina del operador y la información necesaria para controlar y/o manejar la productividad.

En cuanto a la gerencia y supervisión, son parte fundamental en la mejora de la productividad, considerando la eficiencia operativa, las demoras de entrada y salida, refrigerios y tiempos improductivos, entre otros factores.

En este sentido, el uso de la programación lineal entera se ha convertido en un elemento importante en la gestión óptima de los procesos mineros. En el contexto de la explotación minera del Perú, su uso en la asignación de personal es un tema nuevo para muchas empresas, por lo cual existen varias necesidades que se pueden cubrir con la utilización de esta técnica.

El presente proyecto se enfoca en la optimización de los metros perforados de las perforadoras mediante la asignación de operadores utilizando la programación lineal entera. Se ha identificado que la asignación de operadores de perforadoras viene siendo realizada mediante la experiencia de los supervisores, sin embargo, dicha asignación carece de un soporte estadístico. Por esta razón, la importancia del proyecto radica en desarrollar un modelo que permita optimizar los metros perforados de las perforadoras mediante la utilización de la programación lineal entera para la asignación de personal a largo y corto plazo.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivos generales

Desarrollar y aplicar un modelo de programación lineal entera para optimizar la asignación de operadores polifuncionales en una mina de cobre a tajo abierto, con el fin de maximizar la producción de metros perforados y mejorar la eficiencia de las operaciones mineras.

1.3.2. Objetivos específicos

Crear un modelo de programación lineal entera que incorpore las habilidades y restricciones de los operadores polifuncionales y las características operativas de la mina,

con el objetivo de obtener una asignación de operadores que maximice la producción de metros perforados.

Evaluar la robustez del modelo de programación lineal entera para la asignación óptima de operadores polifuncionales en una mina de cobre a tajo abierto, considerando variaciones en los parámetros clave y las condiciones operativas.

1.4. Hipótesis

1.4.1. Hipótesis general

¿Incrementará la aplicación de un modelo de programación lineal entera la producción de metros perforados y mejorará la eficiencia de las operaciones mineras en una mina de cobre a tajo abierto?

1.4.2. Hipótesis específica

¿Permitirá el modelo de programación lineal entera que considera las habilidades y restricciones de los operadores polifuncionales y las características operativas de la mina obtener una asignación de operadores que maximice la producción de metros perforados?

¿Es robusto el modelo de programación lineal entera para la asignación óptima de operadores polifuncionales en una mina de cobre a tajo abierto frente a cambios en los parámetros clave y las condiciones operativas, permitiendo mantener la optimización de los metros perforados de producción incluso en escenarios de variabilidad?

Capítulo II. Marco teórico y conceptual

2.1. Marco teórico

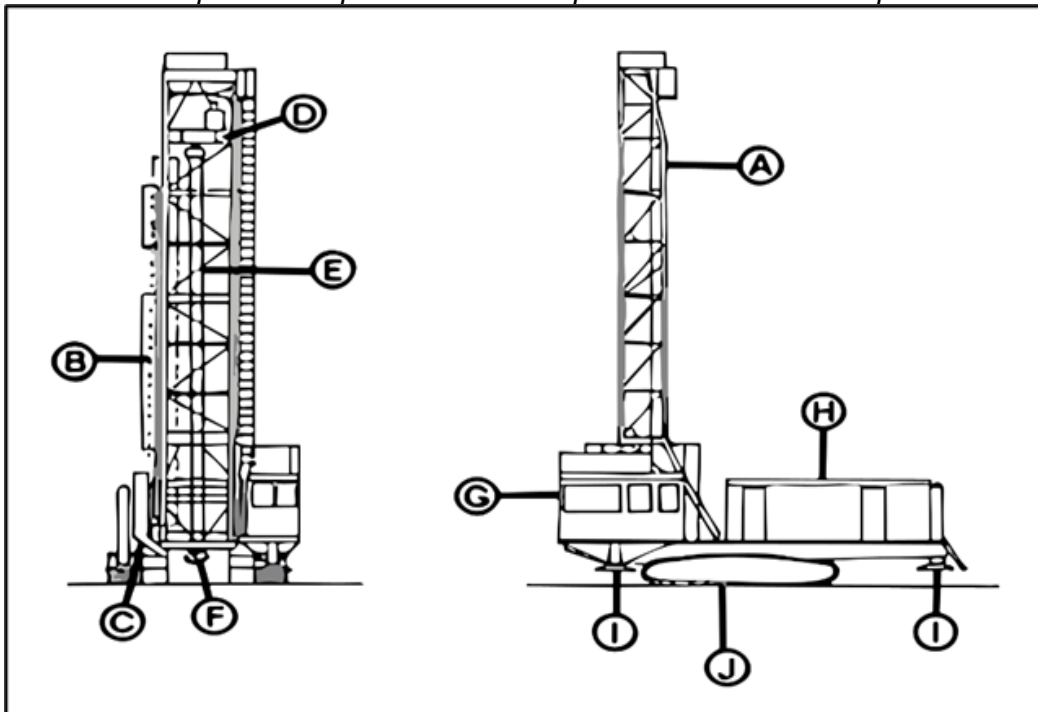
El presente marco teórico aborda los diversos factores que afectan la velocidad de perforación en perforadoras rotativas con brocas tricónicas en minas a tajo abierto. La velocidad de perforación es un parámetro crítico en la industria minera, ya que influye en la eficiencia y productividad de las operaciones de extracción. Por lo tanto, comprender y optimizar los factores que influyen en la velocidad de perforación es de suma importancia.

2.1.1. Perforadoras rotativas

Las perforadoras rotativas son equipos de perforación utilizados en la industria minera para realizar perforaciones en rocas y otros materiales sólidos. La perforación rotativa implica la aplicación de una fuerza de rotación y una fuerza axial sobre una broca, que penetra y desgasta el material a medida que se avanza en la perforación.

Figura 1

Representación esquemática que indica los componentes clave de una perforadora



Fuente. Adaptado de Open Pit Mine, Planning and Design (p. 817), por W.A. Hustrulid, 2013, CRC Press; 3ª Ed.

- A: Mástil
- B: Porta barras
- C: Sistema de recolección de polvo
- D: Caja de rotación
- E: Columna de perforación
- F: Broca
- G: Cabina
- H: Sala de maquinas
- I: Gatos niveladores
- J: Orugas

Las funciones que realiza la máquina se muestran en la Figura 2. Las funciones y sus sistemas de activación/accionamiento han sido resumidos de la siguiente manera:

- Sistema de propulsión, motores
- Elevación y bajada del mástil, cilindros hidráulicos
- Nivelación de la perforadora, cilindros hidráulicos
- Rotación de la broca, motor de rotación
- Presión de bajada de la broca, cilindros hidráulicos o motores
- Cambio de herramienta y aceros, cilindros hidráulicos
- Eliminación de detritus, aire comprimido
- Control de polvo, sistemas opcionales

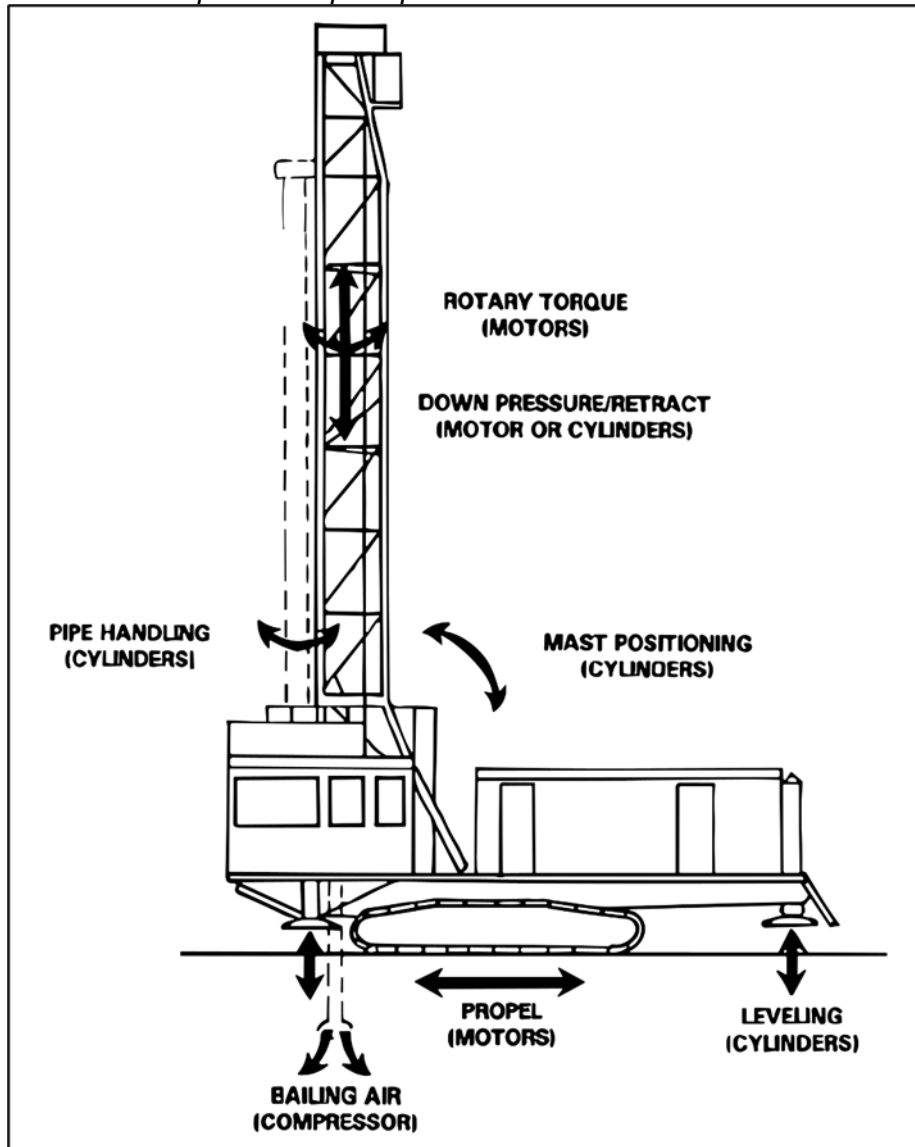
Las operaciones básicas en el proceso de perforación son:

- La máquina es propulsada y maniobrada hasta la posición donde se va a perforar el taladro. Esto se ha determinado previamente mediante la selección de un patrón de perforación.
- Se levanta el mástil en posición. Para movimientos de corta distancia, el mástil se mantiene en posición elevada. Como se ve, el mástil soporta el mecanismo de perforación.

- La máquina se nivela en una orientación horizontal para que los taladros perforados sean consistentemente verticales (o en un ángulo específico). Durante la perforación, las orugas se levantan del suelo.

Figura 2

Funciones realizadas por la máquina perforadora



Fuente. Adaptado de Open Pit Mine, Planning and Design (p. 818), por W.A. Hustrulid, 2013, CRC Press; 3ª Ed.

- La perforación se realiza forzando la broca rotativa en el suelo con una alta presión de bajada o pulldown y un par de torsión rotativo.
- Con el aumento de la profundidad, la barra de perforación en la que está fijada la broca de corte se extiende añadiendo longitudes adicionales de barras de perforación.

- Los detritus formados por la acción de corte de la broca se eliminan del taladro mediante aire de alta velocidad alimentado a través del centro de la columna de perforación. Los detritus de material se llevan hacia arriba por el espacio circular entre el taladro y la columna de perforación.
- Los detritus y los finos expulsados se recogen en la superficie, alrededor de la parte superior del taladro, y las partículas transportadas por el aire pasan por un sistema de recolección de polvo.
- Cuando el taladro se ha completado hasta la profundidad deseada, la broca se retira con la columna de perforación que se va eliminando progresivamente.

Luego, la perforadora comienza la secuencia de reubicación.

Existen varias formas de realizar estas diferentes actividades. Los componentes principales del sistema a discutir son:

- montaje
- motor principal
- rotación
- descenso y elevación
- circulación
- mástil y manejo de varillas

Las plataformas de perforación rotatoria pueden estar montadas en orugas o camiones. Las perforadoras de tamaño medio a grande siempre están montadas en orugas. Las máquinas con neumáticos de goma se utilizan principalmente cuando se perfora en varios sitios separados por distancias significativas. Independientemente del montaje, todas las plataformas de perforación se nivelan y soportan con gatos hidráulicos. Estos pueden operarse simultánea o individualmente para corregir las condiciones irregulares del terreno. La movilidad y maniobrabilidad de la perforadora es proporcionada por el montaje. La movilidad refleja el tiempo que se pasa yendo de un taladro a otro y tiempo de posicionamiento. La maniobrabilidad es la capacidad de posicionar la

perforadora exactamente dónde debe estar. Esto a menudo implica mover la perforadora en un área muy ajustada y posicionarla sobre una ubicación preestablecida. Para volver a perforar taladros, la perforadora debe ser reubicada exactamente. La dirección de las perforadoras montadas en orugas se realiza controlando las orugas. En algunos diseños, una oruga está bloqueada mientras que la otra está en funcionamiento. En otros, ambas orugas pueden ser operadas, una hacia adelante y la otra hacia atrás. Esto proporciona un alto grado de control de dirección. Cada vez es más importante perforar el taladro en la posición y con la orientación deseada, es decir, minimizando la desviación del agujero. Algunas fuentes de desviación de los taladros son:

- precisión de ubicación
- el tipo de terreno (presencia/orientación de estructuras rocosas, dureza variable, etc.)
- la plataforma de perforación
- el grado de instrumentación
- la habilidad del perforador

El motor principal para la plataforma rotatoria generalmente es eléctrico o diésel-hidráulico. Las grandes máquinas de orugas utilizan sistemas eléctricos de CA o CC para los sistemas alimentados. Las perforadoras eléctricas son más baratas de poseer, operar y mantener que las diésel-hidráulicas. La principal ventaja de la máquina diésel es la eliminación del cable de alimentación. Esto permite la flexibilidad para propulsar a cualquier área sin conectar o desconectar la energía eléctrica.

Un carrete de cable de alimentación y características de propulsión remota están disponibles, lo que permite a una persona operar la perforadora (sin la necesidad de un ayudante). Los carretes de cable de alimentación son eléctricos/hidráulicos o de aire. Estos son capaces de enrollar 2000 pies (600m de cable de arrastre). Se necesita energía para:

- Trasladar la plataforma de un sitio a otro
- Operar los gatos y erigir el mástil

- Generar la fuerza de descenso en la broca
- Rotar la broca
- Elevar la broca
- Operar el compresor de aire

La rotación requerida depende de la penetración de las inserciones. Para formaciones de roca dura será pequeño, mientras que para rocas más blandas será alto.

Durante la perforación, la mayor parte de la energía es consumida por el compresor de aire (para la limpieza del taladro) y la unidad rotativa. En la mayoría de las plataformas, un único 'motor principal' acciona el compresor desde un extremo de su eje de transmisión y una "multi-bomba" desde el otro. Las transmisiones de "multi-bomba" tendrán de dos a cuatro bombas, con dos bombas principales. Una bomba principal trabajará la oruga izquierda y la unidad de rotación, mientras que la otra bomba principal trabajará la oruga derecha y el sistema de descenso. Otras bombas funcionarán el aceite del compresor y los ventiladores del radiador del refrigerante del motor.

Existen varios métodos para aplicar el par rotatorio requerido a la sarta de perforación. Para las perforadoras de barras, la potencia rotativa se aplica mediante la unidad de accionamiento superior directamente al extremo de la sarta de perforación. La potencia se aplica mediante una transmisión por engranajes o por un motor hidráulico o eléctrico. La unidad de accionamiento completa está unida a la columna de perforación y se mueve hacia arriba y hacia abajo en las pistas montadas en el mástil. Cuando se necesita una nueva longitud de barra de perforación, el conjunto de accionamiento se desprende de la columna de perforación y se eleva hasta la parte superior del mástil para permitir la inserción de una nueva longitud de barra. Normalmente, las velocidades rotatorias variarán entre 30 y 150 rpm. Muchas operaciones de perforación en formaciones "blandas" suben hasta 150 rpm. Por encima de ese punto, las brocas comienzan a experimentar la rotura del carburo de la hilera de calibre. La mayoría de las perforadoras

están diseñadas con una capacidad de par de entre 10 y 20 ft-lb por cada 100 lb de fuerza descendente.

Todos los sistemas de arrastre utilizan el peso de la plataforma de perforación para reaccionar contra la fuerza descendente aplicada a la broca. En general, la plataforma de perforación será capaz de aplicar aproximadamente el 50 al 60 por ciento de su peso total. La fuerza descendente total que se puede aplicar a la broca depende no solo del peso total de la plataforma sino también de cómo se distribuye ese peso. El equilibrio de la perforadora es crítico. Es obligatorio tener suficiente peso en el extremo de la perforadora para obtener la presión descendente nominal sin levantar la perforadora de los gatos. Existen cinco disposiciones diferentes que se emplean para proporcionar la fuerza de arrastre en un sistema de accionamiento superior.

- Cremallera y piñón directos
- Cadena y piñón directos
- Cadena y cilindro
- Cremallera y piñón con cadena
- Cable y cilindro

Los sistemas de cremallera y piñón y de cadena y piñón son los más comunes. El sistema de cadena y piñón utiliza un engranaje de piñón accionado hidráulicamente que se acopla y mueve dos cadenas de rodillos continuas unidas a ambos lados del montaje del motor de accionamiento superior. Otro sistema utiliza un engranaje de piñón accionado unido a la unidad de accionamiento rotatorio que acopla una cremallera montada a lo largo de cada lado del mástil. Este sistema elimina la 'suavidad' de las conexiones de cadena o cable entre la cabeza y la unidad de accionamiento.

La plataforma debe ser capaz de aplicar empujes de 4000 a 9000 lb/pulg de diámetro de broca dependiendo del tamaño de la broca a utilizar.

El aire es suministrado por uno o más compresores a bordo. Aunque en el pasado se utilizaban tanto de tornillo (presión media) o paleta rotatoria deslizante (baja presión),

hoy en día solo se emplean compresores de tipo tornillo. Los compresores de un solo etapa pueden suministrar aire a 30-110 psi. Las perforadoras de P&H y Caterpillar/Bucyrus Erie generalmente se ajustan a un máximo de 60 psi, mientras que Sandvik/Drilltech/Tamrock se ajusta entre 80-100 psi y las perforadoras de Epiroc a 110 psi. Una unidad de dos etapas puede suministrar aire de baja presión a 30-60 psi y aire de alta presión a 100-350 psi (algunas perforadoras hasta 500 psi).

Las partículas más pesadas se asientan alrededor de la parte superior del taladro, generalmente contenidas por cortinas flexibles. Existen dos tipos básicos de paquetes de control de polvo utilizados en perforadoras de barras: inyección de agua y tipo seco. La inyección de agua se basa en un tanque de agua para suministrar de 0.5 a 2 gpm de agua a la broca. La inyección de agua generalmente resultará en una vida útil de la broca un 15 a 20% más corta dependiendo de cuánta agua se utilice.

En una unidad de tipo seco, se utiliza un ventilador para succionar partículas finas en un sistema de recolección de polvo montado en la cubierta. Se pueden usar ciclones en bolsas de filtro para la separación de partículas finas.

Figura 3

Equipo de perforación Sandvik D90KS con el mástil posicionado para perforar taladros inclinados en una mina australiana



Fuente. Adaptado de Open Pit Mine, Planning and Design (p. 822), por W.A. Hustrulid, 2013, CRC Press; 3ª Ed.

Los mástiles están articulados y conectados a cilindros hidráulicos. Esto permite que el mástil se pueda bajar, si es necesario, al mover el equipo de perforación. Si el centro de gravedad de la perforadora es bajo, el movimiento es corto y el terreno es adecuado, no es necesario bajar el mástil al moverlo.

La profundidad máxima del taladro es una función de la altura del mástil, que limita tanto la longitud de la barra de perforación como la cantidad de barras de perforación que se puede almacenar y manejar de manera eficiente.

En el pasado, el almacenamiento de las barras de perforación se proporcionaba, más comúnmente, mediante un dispositivo de sujeción de carrusel giratorio vertical montado en el frente del mástil. Hoy en día, los taladros de un solo paso no tienen carrusel. Más bien, algunos fabricantes proporcionan una o dos barras extra en los portabarras del mástil.

Para la mayoría de las perforadoras hay una elección de tamaños de mástil disponibles. Estos generalmente se dan en términos de la longitud de un vástago de perforación (profundidad máxima del taladro en un solo paso) que pueden acomodar. La longitud real del mástil es considerablemente más larga que la longitud del vástago ya que debe incluir las barras de perforación, broca, estabilizador, cabeza rotatoria, acoplamiento rotatorio (giratorio), olla de broca, acoplamiento de choque, etc. La distancia desde la cubierta del mástil hasta el suelo es aproximadamente de 5 pies. La broca, el estabilizador y el acoplamiento rotatorio agregan aproximadamente otros 5 pies cada uno. Por lo tanto, se necesita una longitud de mástil de aproximadamente 75 pies cuando se perfora 50 pies en un solo paso.

El frente y la parte trasera de la máquina de perforación se especifican con respecto a la posición del mástil. El frente de la perforadora es el extremo al que el operador se enfrentaría cuando mira hacia el mástil. Por lo tanto, la parte trasera de la máquina es la más cercana al taladro.

Si el patrón de perforación requiere taladros inclinados, el mástil se puede inclinar desde la vertical. Los ángulos pueden variar de 0 a 15 o 30 grados generalmente en

incrementos de 5 grados. El mástil se fija en posición durante la perforación real. La Figura 3 muestra un equipo de perforación con el mástil listo para la perforación de agujeros inclinados.

La perforación de taladros en ángulo puede ser ventajosa en algunas circunstancias. Se informa que la perforación en ángulo ayuda a:

- minimizar la rotura en la parte trasera
- aumentar la rotura en la punta
- obtener una mejor fragmentación
- reducir el ruido y las ondas de choque

Sin embargo,

- La producción puede disminuir ya que la capacidad de empuje hacia abajo se reduce.
- La columna de perforación obstaculizará la salida de los recortes a medida que la columna de perforación roza la parte inferior del taladro.
- Las conexiones de tuberías también son más lentas.
- Los costos de mantenimiento pueden aumentar también con la perforación de taladros en ángulo.
- La broca y la barra de perforación que golpea contra la pared lateral inferior del taladro pueden inducir vibración a la máquina.
- Otros factores para considerar son el mayor gasto de capital para los accesorios de agujeros en ángulo y el equipo auxiliar.

Una vieja regla general es que la perforación de agujeros en ángulo reduce la producción en aproximadamente un 20% y, posiblemente, debido a esto, la perforación en ángulo aún se usa raramente en la minería de metales. Sin embargo, la perforación en ángulo se utiliza a menudo en la voladura de fundición de estéril de carbón con muy buenos resultados.

A continuación, se presenta una descripción de los tres modelos de perforadoras consideradas en el estudio:

2.1.1.1. CAT MD 6640. La perforadora rotativa CAT MD 6640 de Caterpillar es una máquina de perforación eléctrica de alta capacidad diseñada para su uso en minas a cielo abierto y proyectos de construcción de gran escala. Algunas características clave de este modelo incluyen:

- Diámetro de perforación: 244 – 406 mm (9"5/8 – 16"
- Un solo paso: 19.81 m. (65ft)
- Múltiple pasada: 39.6 m. (130ft)
- Peso Operativo Máximo: 154,224 kg. (340,000Klbs)
- Fuerza sobre la broca: 63,956 Kg. (141,000 Klbs)
- Velocidad de rotación: 125 RPM 145Kw (194 hp)
- Motor Principal: Siemens (600 hp) 4160 – 7200 V
- Compresor de aire: LOROI 3000 cfm a 65 psi
- Tren de rodamiento: CAT 1.77 k/h (1.1 m/h) / 1.45 k/h (0.9 m/h)

Figura 4

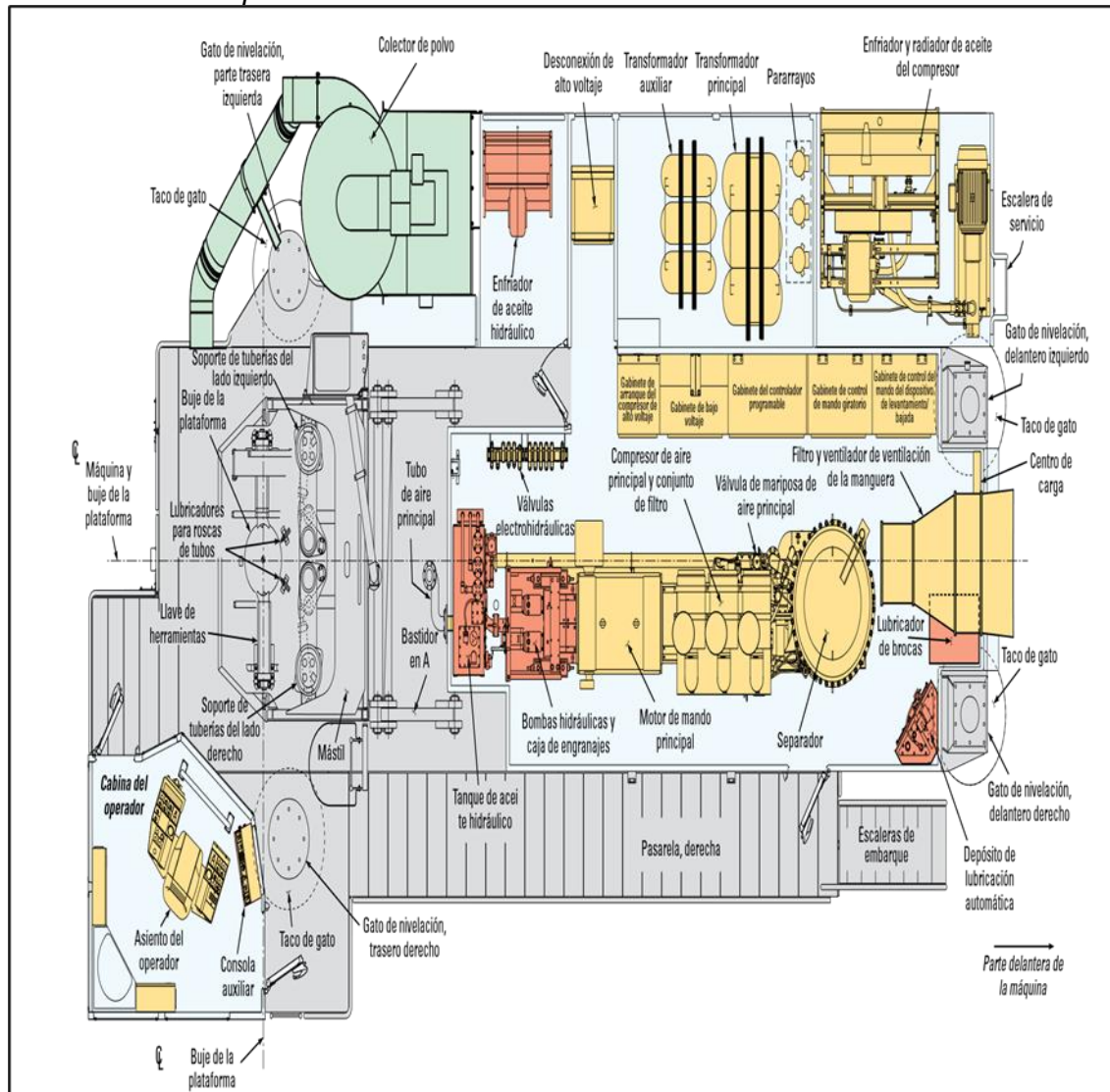
Perforadora rotativa de taladros de voladura CAT MD6640



Fuente. Adaptado de MD6640, Matco. (s.f.), 2012, Matco (<https://www.matco.com.mx/producto-nuevo/mineria/perforadoras/nuevo/md6640-2012?tipo=perforadoras-giratorias>)

Figura 5

Vista General de la perforadora MD6640



Fuente. Adaptado de Manual de operación y mantenimiento (BI12546_ES), Caterpillar, 2013.

2.1.1.2. EPIROC PV 351D. La perforadora rotativa Epiroc PV 351D es un modelo de motor diésel diseñado para aplicaciones de minería a cielo abierto y construcción. Sus principales características son:

- Diámetro de perforación: 270 – 406 mm (10” 5/8 – 16”)
- Un solo paso: 19.8 m. (65ft)
- Múltiple pasada: 41.1 m. (135ft)
- Peso Operativo Máximo: Diesel 175,000 kg. (385,000 Klbs)
- Fuerza sobre la broca: 56,700 Kg. (125,000 Klbs)
- Velocidad de rotación: 170 RPM Máxima velocidad

- Motor Principal: CAT 3512 B a 1650 HP (1230kW)@1800RPM
- Compresor de aire: IR. 3800 CFM (107,6 m³/min) a 110 PSI
- Tren de rodamiento: CAT tipo exca. 375/385 a 1.0 mph (1.6 km/h)

Figura 6

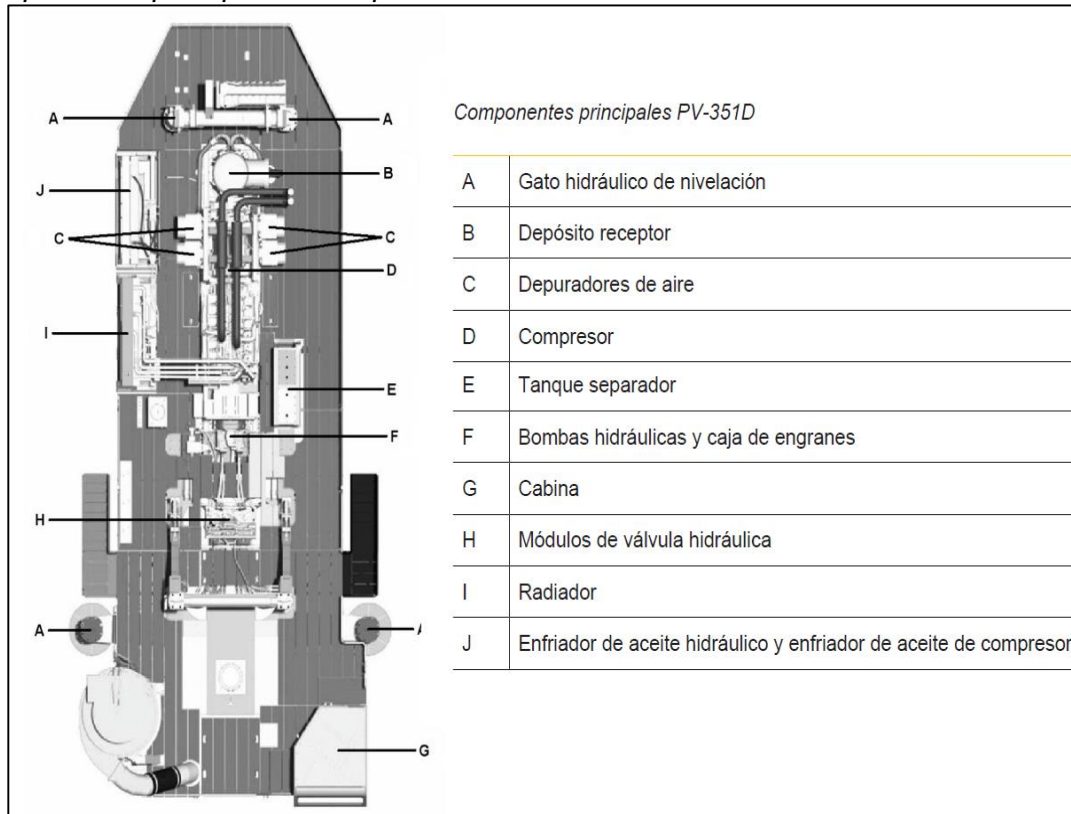
Perforadora rotativa de taladros de voladura PV 351D



Fuente. Adaptado de PV-351D RCS 4.19 Operación (Nro: 11129695755.1.11129713419 es-MX), Epiroc., 2019.

Figura 7

Componentes principales de la perforadora rotativa PV 351D



Fuente. Adaptado de PV-351D RCS 4.19 Operación (Nro: 11129695755.1.11129713419 es-MX), Epiroc, 2019.

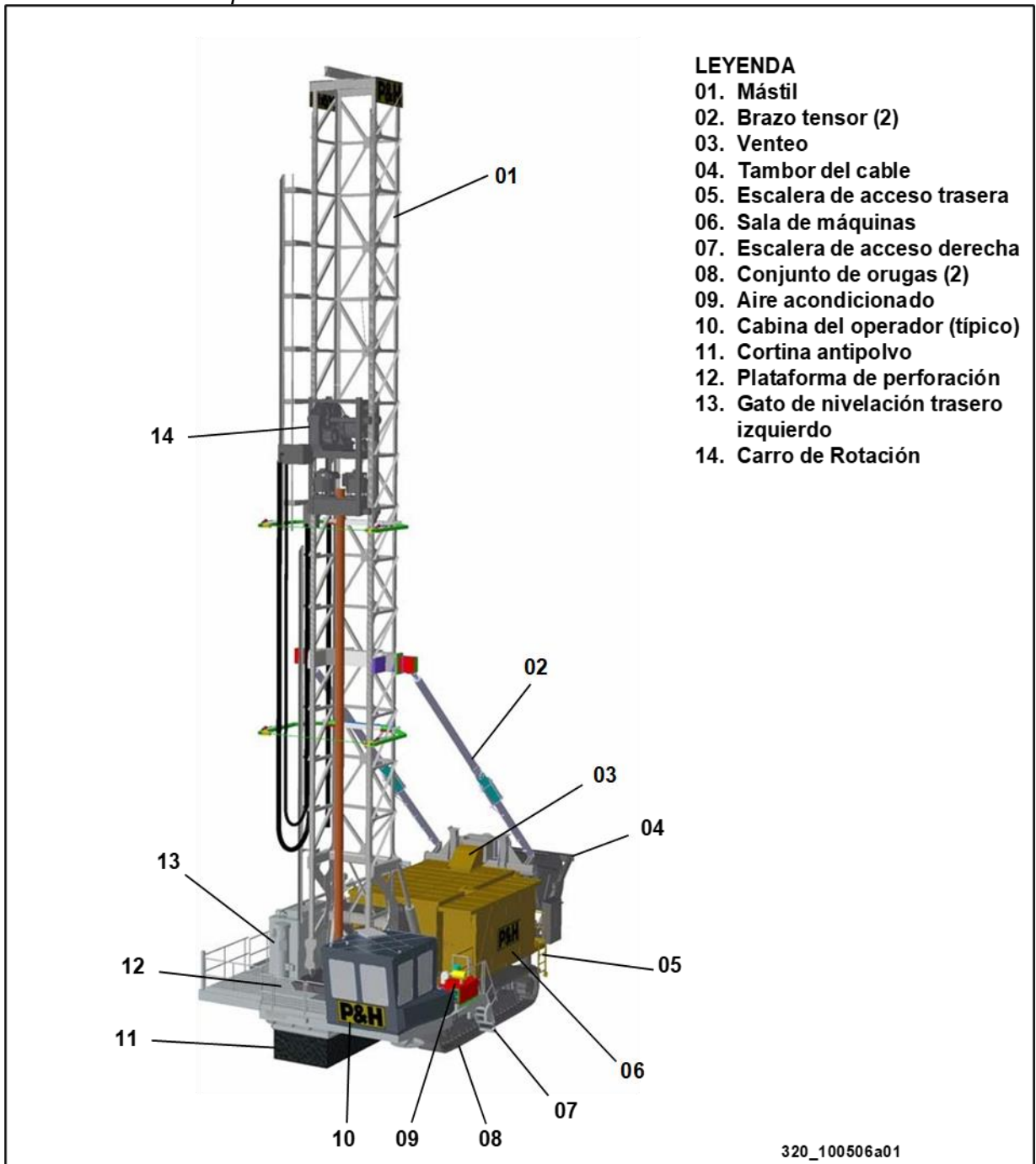
2.1.1.3. P&H 320 XPC. La perforadora rotativa P&H 320 XPC de P&H Mining Equipment es un modelo eléctrico diseñado para aplicaciones de minería a gran escala.

Entre sus características destacadas se incluyen:

- Diámetro de perforación: 270 – 445 mm (10” 5/8 – 17 1/2”)
- Un solo paso: 19.8 m. (65ft)
- Capacidad máxima de barras: 02 barras de 10 3/4”
- Peso Operativo Máximo: 181,437 kg. (400,000 Klbs)
- Fuerza de avance (estándar): 150,000 lbs. (68,038 Kg)
- Velocidad de rotación: 0 – 119 RPM
- Motor Principal: P&H 1,000HP (746KW) a 7200 V
- Compresor de aire: Garden Denver 3,450 cfm a 60 psi
- Velocidad de desplazamiento: 0.97 km/h Baja – 1.61 km/h Alta

Figura 8

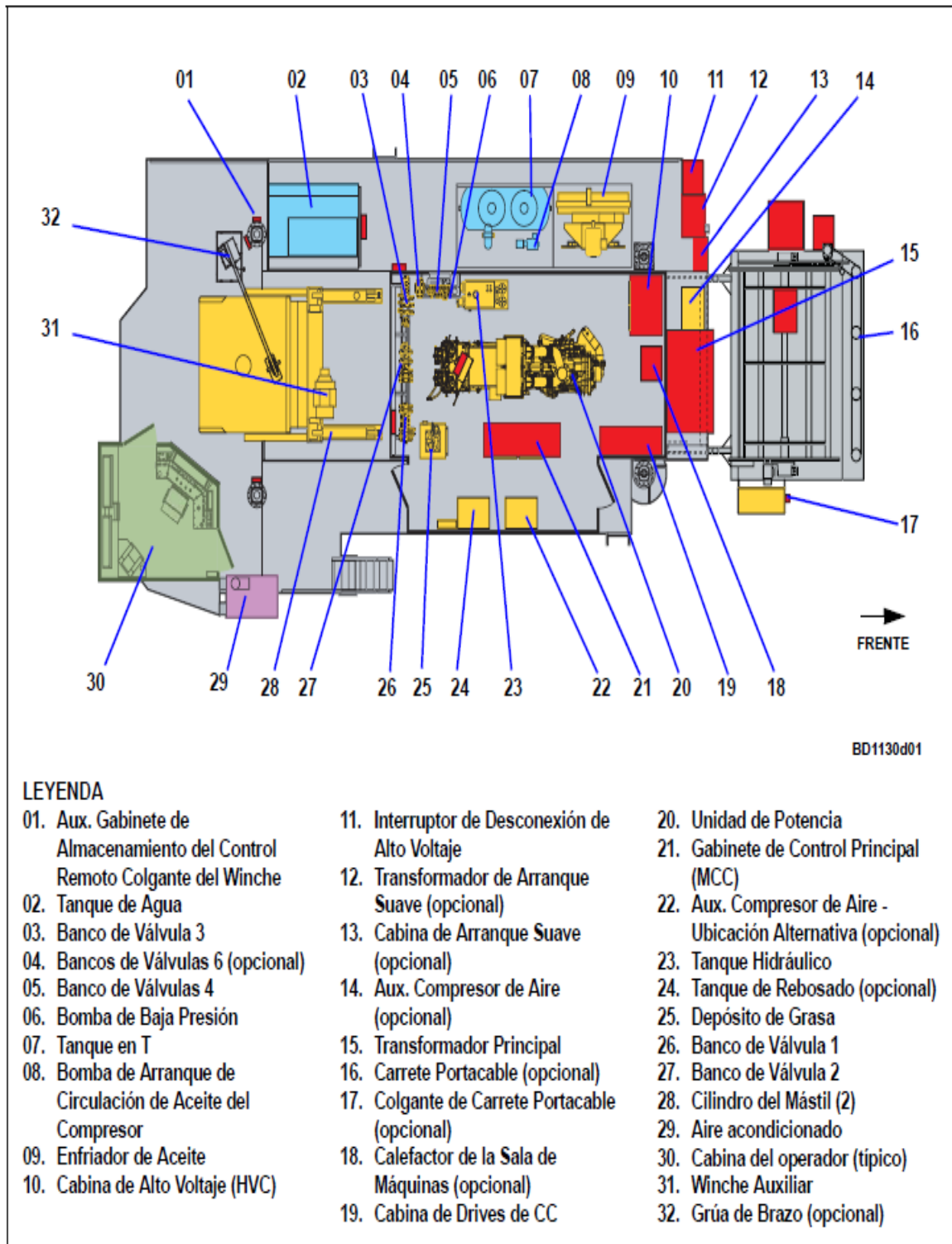
Perforadora rotativa para taladros de voladura modelo 320XPC



Fuente. Adaptado de Manual del Operador 320XPC (32XC-D-O-MM-LA-0002) (p. XX), P&H Mining Equipment, Inc., 2013.

Figura 9

Plano de cubierta de la perforadora 320XPC



Fuente. Adaptado del Manual del Operador 320XPC (32XC-D-O-MM-LA-0002), P&H Mining Equipment, Inc., 2013.

2.1.1.4. Precauciones de seguridad al operar las perforadoras. Es importante tomar medidas de seguridad adecuadas al trabajar con maquinarias pesadas y

herramientas, como las perforadoras de roca. Estas medidas deben abarcar desde la selección y capacitación del personal, hasta la implementación de procedimientos y prácticas de trabajo seguro en la rutina diaria. La protección de la seguridad y salud de los trabajadores es fundamental para garantizar la eficiencia, productividad y éxito de la operación minera. En esta línea, se presentaron una serie de recomendaciones para mantener la seguridad durante el trabajo con las perforadoras.

- Para minimizar las detenciones de la máquina y maximizar su productividad, se recomienda emplear personal calificado de mantención y utilizar programas de mantención programada.
- Es importante mantener las manos, pies y vestimenta alejados de partes en rotación para evitar accidentes.
- Se debe utilizar casco, zapatos y lentes protectores de seguridad para garantizar la seguridad personal durante el trabajo.
- Si los letreros de seguridad y advertencia están dañados o faltan en la máquina, deben ser reemplazados inmediatamente.
- Se recomienda pensar antes de actuar para evitar negligencias en el trabajo.
- Es importante tener precaución al manipular sellantes o solventes, ya que el exceso o repetido contacto con ellos puede causar irritaciones en la piel. En caso de contacto con la piel, se debe consultar la Hoja de Datos de Materiales de Seguridad (HDMS) para conocer el método adecuado de limpieza.
- Todos los cerrojos de seguridad (fijadores) en los ganchos de levante deben ser inspeccionados regularmente para asegurarse de que funcionen adecuadamente y evitar que la carga se deslice del gancho.
- Si un ítem pesado comienza a caer, es mejor dejarlo caer en lugar de intentar sujetarlo y correr el riesgo de sufrir un accidente.
- Para prevenir accidentes, se recomienda mantener el área de trabajo limpia y organizada, limpiando inmediatamente cualquier derrame de aceite u otro tipo

de líquido, manteniendo las herramientas y partes fuera del suelo y eliminando cualquier posibilidad de caída, resbalón o tropiezo.

- Los pisos, pasillos y escaleras deben mantenerse limpios y secos, y después de operaciones de drenaje, se debe asegurar que se limpien todos los derrames.
- La combinación de cables eléctricos y pisos metálicos mojados es peligrosa, por lo que se debe tomar precaución al trabajar en estas condiciones.
- Se deben inspeccionar regularmente los pernos o dispositivos de cierre para asegurarse de que estén bien ajustados y evitar que se suelten.
- Es importante tomar precauciones extremas al trabajar cerca de líneas o equipos eléctricos, y solo los electricistas calificados deben realizar reparaciones eléctricas.
- Después de completar el servicio en la máquina, todas las herramientas, componentes o equipamiento de servicio deben retirarse y almacenarse adecuadamente.
- Los frenos mecánicos están diseñados solo para uso como frenaje estático de sujeción, por lo que solo se deben usar como frenos para movimiento (dinámicos) en situaciones de emergencia.
- Se recomienda usar una iluminación adecuada tanto interna como externa.
- Es importante instalar y mantener una conexión a tierra correcta y sistemas apropiados de protección contra fallas de conexión a tierra.
- Se deben realizar pruebas funcionales de todos los circuitos de seguridad para garantizar su correcto funcionamiento.
- Solo los electricistas calificados deben realizar inspecciones y mantenciones eléctricas.
- Es necesario tener precaución al trabajar alrededor de orificios que se hicieron, ya que pueden presentar peligros para la seguridad.

La aplicación de medidas de seguridad efectivas y el seguimiento de prácticas de trabajo seguro son clave para minimizar el riesgo de accidentes y aumentar la productividad en el trabajo con la perforadora. Desde el mantenimiento programado, el uso adecuado del equipo de protección personal, hasta la limpieza y organización del lugar de trabajo, se deben seguir estrictamente todas las recomendaciones de seguridad para garantizar la protección de los trabajadores. La seguridad y salud en el trabajo son responsabilidad de todos, y es fundamental tenerlas en cuenta para lograr una operación minera exitosa y sostenible.

2.1.1.5. Avances tecnológicos en las perforadoras rotativas

2.1.1.5.1. Automatización y control remoto:

- **Automatización:** La automatización en las perforadoras rotativas se refiere a la capacidad de la máquina de realizar tareas de perforación de manera autónoma, sin la necesidad de un operador humano constante. Esto se logra mediante la incorporación de sistemas de control inteligentes y sensores en el equipo de perforación. La automatización puede aumentar la eficiencia, ya que la máquina puede trabajar de manera continua sin pausas. Además, puede mejorar la precisión de la perforación, ya que los sistemas de control pueden ajustar con precisión la velocidad, la presión y otros parámetros basándose en los datos que recogen en tiempo real. Finalmente, la automatización puede mejorar la seguridad al reducir la necesidad de que los operadores humanos estén en la proximidad de la perforadora.
- **Control remoto:** El control remoto de las perforadoras rotativas permite a los operadores controlar la máquina desde una ubicación segura, a menudo en una sala de control remota. Esto puede aumentar la seguridad al eliminar la necesidad de que los operadores estén cerca del equipo de perforación, lo que puede ser peligroso. El control remoto a menudo se realiza a través de un enlace de comunicación inalámbrico, lo que permite a los operadores controlar la perforadora desde una distancia considerable. Los operadores pueden

monitorear el progreso de la perforación a través de cámaras y otros sensores montados en la perforadora.

Estas tecnologías están evolucionando rápidamente, y las nuevas perforadoras rotativas a menudo incorporan ambos, automatización y control remoto, para aumentar la eficiencia, la precisión y la seguridad.

2.1.1.5.2. Electrificación y eficiencia energética:

- **Electrificación:** La electrificación se refiere a la transición de las perforadoras rotativas de combustibles fósiles a la electricidad como fuente de energía. Esto puede tener varios beneficios. Primero, las perforadoras eléctricas pueden ser más eficientes y menos costosas de operar a largo plazo, ya que la electricidad a menudo es más barata que los combustibles fósiles. Segundo, las perforadoras eléctricas pueden ser más amigables con el medio ambiente, ya que no emiten gases de efecto invernadero durante la operación. Por último, las perforadoras eléctricas pueden ser más silenciosas y generar menos vibraciones que las perforadoras a base de combustibles fósiles, lo que puede ser beneficioso en términos de confort del operador y reducción de la perturbación en la mina.
- **Eficiencia energética:** Mejorar la eficiencia energética de las perforadoras rotativas significa hacer que la máquina sea capaz de realizar la misma cantidad de trabajo, pero utilizando menos energía. Esto puede lograrse de varias maneras, por ejemplo, a través del diseño de la máquina, la selección de los materiales, y el uso de tecnologías de control avanzadas. Las perforadoras más eficientes en términos energéticos pueden reducir los costos operativos y también son más ecológicas, ya que consumen menos energía y, por lo tanto, producen menos emisiones de gases de efecto invernadero (si la energía proviene de fuentes de combustibles fósiles).

Estos avances en la electrificación y la eficiencia energética están transformando la industria de las perforadoras rotativas y se espera que su importancia continúe creciendo en el futuro.

2.1.1.5.3. Automatización y control de perforadoras rotativas:

- La automatización y el control mejorado de las perforadoras rotativas ofrecen una serie de beneficios en términos de eficiencia, seguridad y productividad. Algunos de los desarrollos en este campo incluyen:
- Sistemas de navegación y posicionamiento: Estos sistemas permiten que las perforadoras rotativas determinen su posición y orientación exactas en tiempo real. Esto puede mejorar la precisión y calidad de los trabajos de perforación al garantizar que los agujeros se realicen en las ubicaciones y ángulos deseados.
- Control autónomo: La tecnología de control autónomo permite que las perforadoras rotativas funcionen sin intervención humana directa, utilizando algoritmos y sensores para tomar decisiones y realizar ajustes en tiempo real. Esto puede aumentar la eficiencia al minimizar errores humanos y permitir que las máquinas trabajen en condiciones difíciles o peligrosas sin poner en riesgo la seguridad del personal.
- Monitoreo y análisis de datos en tiempo real: Los sistemas de monitoreo y análisis de datos en tiempo real pueden proporcionar información valiosa sobre el rendimiento de la perforadora y las condiciones del suelo. Esto puede ayudar a los operadores a tomar decisiones informadas sobre cómo ajustar la perforadora para maximizar la eficiencia y prevenir problemas antes de que ocurran.
- Mantenimiento predictivo: La automatización y el control avanzado también pueden utilizarse para monitorear el estado de los componentes de la perforadora y predecir cuándo es probable que fallen. Esto permite programar

el mantenimiento antes de que se produzcan fallos, lo que reduce el tiempo de inactividad y los costos asociados.

En conjunto, estos avances en la automatización y el control de las perforadoras rotativas están mejorando la eficiencia y la seguridad en la industria minera, al tiempo que reducen los costos y aumentan la productividad.

2.1.1.5.4. Mayor integración con sistemas de información y análisis de datos.

En los últimos años, la minería ha estado adoptando cada vez más la tecnología de la información para mejorar la eficiencia y la seguridad de las operaciones. Las perforadoras rotativas no son una excepción a esta tendencia.

La integración de las perforadoras con sistemas de información permite recoger y analizar una gran cantidad de datos en tiempo real. Esto puede incluir información sobre la ubicación de la perforadora, la profundidad y la orientación de los agujeros perforados, la dureza del material que se está perforando, y la eficiencia de la perforadora.

Esta información puede ser utilizada para tomar decisiones informadas en tiempo real, como ajustar la velocidad de perforación o la presión aplicada a la broca. Además, los datos recopilados pueden ser analizados posteriormente para identificar tendencias o problemas potenciales, lo que puede ayudar a prevenir fallas en el equipo y mejorar la eficiencia de la perforación.

Además, se está utilizando la inteligencia artificial y el aprendizaje automático para analizar estos datos y hacer recomendaciones sobre cómo mejorar las operaciones de perforación. Esto puede incluir sugerencias sobre dónde perforar basándose en los datos geológicos, o recomendaciones sobre cómo ajustar la perforadora para mejorar su eficiencia en función de las condiciones actuales.

En resumen, la mayor integración con los sistemas de información y análisis de datos está permitiendo un mayor control y optimización de las operaciones de perforación, lo que puede llevar a una mayor eficiencia y seguridad en el trabajo.

2.1.1.5.5. Sistemas de energía alternativos. Con el aumento de la preocupación por el impacto medioambiental de las operaciones mineras, la industria ha estado

explorando formas de reducir su huella de carbono. Una de las formas en que esto se está logrando es a través del uso de fuentes de energía alternativas para operar las perforadoras rotativas.

Por ejemplo, algunas perforadoras rotativas están siendo diseñadas para operar con energía eléctrica en lugar de diésel. Las perforadoras eléctricas pueden ser más eficientes y producen menos emisiones que las perforadoras diésel. Además, si la electricidad que se utiliza para alimentar las perforadoras es generada a partir de fuentes renovables, como la energía eólica o solar, el impacto medioambiental puede ser aún menor.

Además, algunas empresas están experimentando con el uso de hidrógeno como fuente de energía para las perforadoras. El hidrógeno puede ser producido a partir de agua utilizando electricidad renovable, y cuando se utiliza como combustible, el único subproducto es el agua, lo que lo convierte en una opción muy limpia.

Estos avances en los sistemas de energía alternativos para las perforadoras rotativas no sólo pueden ayudar a reducir el impacto medioambiental de las operaciones mineras, sino que también pueden resultar en ahorros de costos a largo plazo, ya que la electricidad y el hidrógeno pueden ser más baratos que el diésel en algunos casos.

2.1.1.5.6. Tecnologías de reducción de vibración y ruido. Las perforadoras rotativas son conocidas por producir niveles significativos de ruido y vibración, lo que puede ser perjudicial para los operadores y puede causar fatiga en el equipo con el tiempo. Sin embargo, los avances recientes en la tecnología de reducción de ruido y vibración están ayudando a abordar este problema.

Se están implementando una serie de técnicas para reducir las vibraciones, incluyendo el uso de amortiguadores de vibración más avanzados y la mejora de los sistemas de aislamiento de vibraciones. Estos pueden ayudar a minimizar la cantidad de vibración que se transmite desde la perforadora al operador, mejorando la comodidad del operador y reduciendo la fatiga del equipo.

En cuanto a la reducción del ruido, se están utilizando técnicas como la encapsulación del motor y los sistemas de escape mejorados para reducir el ruido producido por las perforadoras. Además, se están utilizando materiales de aislamiento acústico más avanzados en las cabinas de los operadores para minimizar el ruido que llega al operador.

Estos avances en la tecnología de reducción de ruido y vibración no sólo mejoran las condiciones de trabajo para los operadores de las perforadoras, sino que también pueden ayudar a prolongar la vida útil del equipo al reducir el desgaste causado por las vibraciones.

2.1.2. Factores que afectan la velocidad de perforación

Las propiedades de la roca son un factor clave que afecta la velocidad de perforación. Algunas de las propiedades más relevantes incluyen:

2.1.2.1. Propiedades de la roca

- **Dureza:** La dureza de la roca es una medida de su resistencia al desgaste y al rayado. Rocas más duras requieren mayor fuerza para ser perforadas, lo que puede disminuir la velocidad de perforación.
- **Resistencia a la compresión:** La resistencia a la compresión de la roca indica la capacidad de la roca para resistir la carga axial aplicada durante la perforación. Rocas con mayor resistencia a la compresión pueden ser más difíciles de perforar y, por lo tanto, reducir la velocidad de perforación.
- **Abrasividad:** La abrasividad de la roca se refiere a su capacidad para desgastar la broca durante el proceso de perforación. Rocas más abrasivas pueden acelerar el desgaste de la broca y disminuir la velocidad de perforación a medida que la broca se vuelve menos eficiente.
- **Estructura geológica:** La presencia de fracturas, fallas, estratificación y otras características geológicas puede influir en la velocidad de perforación al afectar la integridad de la roca y su resistencia al avance de la broca.

2.1.2.2. Parámetros de perforación

- Fuerza de pulldown (peso sobre la broca): La fuerza de pulldown aplicada sobre la broca influye en su capacidad para penetrar la roca. Si la fuerza es insuficiente, la broca no podrá avanzar adecuadamente. Sin embargo, una fuerza excesiva puede causar desgaste prematuro y daños en la broca.
- Velocidad de rotación: La velocidad de rotación de la broca afecta la eficiencia del corte y, por ende, la velocidad de perforación. Velocidades de rotación más altas pueden aumentar la velocidad de perforación, pero también pueden provocar un mayor desgaste de la broca y la posibilidad de atascamiento.
- Caudal del fluido de perforación: El fluido de perforación ayuda a enfriar y lubricar la broca, así como a eliminar los detritos de la perforación. Un caudal insuficiente puede reducir la velocidad de perforación al aumentar la fricción y el desgaste de la broca, mientras que un caudal excesivo puede generar pérdida de energía y recursos.

2.1.2.3. Diseño y condiciones de la broca

- Diseño de los dientes: El tamaño, la forma y el ángulo de ataque de los dientes de la broca influyen en la eficiencia de corte y la velocidad de perforación. Un diseño adecuado para las condiciones de la roca puede mejorar significativamente la velocidad de perforación.
- Espacio entre los dientes: El espacio entre los dientes de la broca influye en la cantidad de material que puede ser cortado y eliminado en cada revolución. Un espacio adecuado permite un corte y eliminación de detritos más eficientes, lo que se traduce en una mayor velocidad de perforación.
- Desgaste de la broca: El desgaste de los dientes y los cojinetes de la broca tricónica puede reducir la eficiencia de corte y la velocidad de perforación a medida que la broca se vuelve menos efectiva para penetrar la roca. El

monitoreo y la sustitución periódica de las brocas desgastadas pueden mejorar la velocidad de perforación y la eficiencia general del proceso.

- **Acumulación de detritos:** La acumulación de detritos en los conos de la broca tricónica puede interferir con el corte y la eliminación de material, lo que resulta en una disminución de la velocidad de perforación. La utilización de fluidos de perforación adecuados y el mantenimiento regular de la broca pueden ayudar a minimizar la acumulación de detritos y mantener la velocidad de perforación.

2.1.2.4. Fluidos de perforación. Los fluidos de perforación juegan un papel importante en la velocidad de perforación al proporcionar lubricación, enfriamiento y eliminación de detritos. Algunas consideraciones clave incluyen:

- **Tipo de fluido de perforación:** El tipo de fluido de perforación utilizado (por ejemplo, base agua, base aceite, sintéticos) puede afectar la velocidad de perforación al proporcionar diferentes niveles de lubricación y enfriamiento. La selección del fluido de perforación adecuado para las condiciones específicas de la roca y la perforación es esencial para optimizar la velocidad de perforación.
- **Viscosidad y densidad del fluido:** La viscosidad y la densidad del fluido de perforación influyen en su capacidad para eliminar los detritos y proporcionar un enfriamiento y lubricación adecuados. Un fluido demasiado viscoso o denso puede reducir la velocidad de perforación al dificultar la eliminación de detritos y aumentar la fricción entre la broca y la roca.
- **Caudal del fluido de perforación:** Caudal del fluido de perforación: Como se mencionó anteriormente, el caudal del fluido de perforación es un parámetro de perforación importante que influye en la velocidad de perforación. Un caudal adecuado es necesario para garantizar una lubricación, enfriamiento y eliminación de detritos eficientes, lo que contribuye a una mayor velocidad de perforación.

2.1.3. Influencia de los operadores en la velocidad de perforación

La experiencia del operador de la perforadora juega un papel importante en la velocidad de perforación y la eficiencia general de la operación. Un operador experimentado puede influir en la velocidad de perforación de las siguientes maneras:

Conocimiento del equipo: Un operador con experiencia tiene un conocimiento profundo de las capacidades y limitaciones de la perforadora y de la broca tricónica. Esto le permite utilizar el equipo de manera más eficiente, ajustando los parámetros de perforación, como la fuerza axial, la velocidad de rotación y el caudal del fluido de perforación, para optimizar la velocidad de perforación según las condiciones de la roca y las características del equipo.

Toma de decisiones: Los operadores experimentados tienen habilidades de toma de decisiones bien desarrolladas, lo que les permite anticipar y enfrentar problemas durante la perforación, como atascamientos, desgaste excesivo de la broca o cambios en las condiciones de la roca. Estas habilidades les permiten tomar decisiones adecuadas y rápidas para mantener la velocidad de perforación y minimizar el tiempo de inactividad del equipo.

Mantenimiento preventivo: Los operadores experimentados reconocen la importancia del mantenimiento preventivo en el rendimiento y la vida útil de la perforadora y la broca tricónica. Son capaces de detectar signos de desgaste o problemas en el equipo antes de que se conviertan en problemas más graves, lo que permite realizar mantenimiento y reparaciones oportunas. Al mantener el equipo en buen estado, se garantiza un rendimiento óptimo y se mantiene una velocidad de perforación eficiente.

Adaptabilidad a diferentes condiciones: Los operadores experimentados tienen la capacidad de adaptarse rápidamente a diferentes condiciones de perforación, como cambios en la dureza de la roca, la presencia de fracturas o la variación en la abrasividad. Esta adaptabilidad les permite ajustar los parámetros de perforación y las técnicas de operación según las condiciones específicas, lo que resulta en una mayor velocidad de perforación y eficiencia.

Capacitación y mentoría: Los operadores con experiencia pueden transmitir sus conocimientos y habilidades a otros miembros del equipo, lo que ayuda a mejorar la eficiencia y la velocidad de perforación en toda la operación. La capacitación y el apoyo continuo de los operadores experimentados pueden ser valiosos para el desarrollo de habilidades y la formación de nuevos operadores.

En resumen, la experiencia del operador de la perforadora afecta significativamente la velocidad de perforación, ya que un operador experimentado puede optimizar los parámetros de perforación, tomar decisiones informadas, realizar mantenimiento preventivo, adaptarse a diferentes condiciones y capacitar a otros miembros del equipo. La inversión en la formación y el desarrollo de operadores experimentados es esencial para mejorar la eficiencia y la velocidad de perforación en las operaciones mineras.

La perforación en la minería tiene la finalidad de desgastar las rocas en el área de extracción de material mediante maquinaria, la cual se le conoce como perforadora. La cual, para su desarrollo se evalúa un sistema según las condiciones del área.

2.1.4. Programación lineal entera (PLE)

La programación lineal entera (PLE) es una rama de la optimización matemática que se ocupa de encontrar soluciones óptimas a problemas de decisión en los que las variables de decisión están restringidas a valores enteros. La PLE es una extensión de la programación lineal (PL), donde las variables de decisión pueden ser continuas. La PLE es ampliamente utilizada en diversos campos, como la logística, la planificación de la producción, la asignación de recursos y la gestión de proyectos, debido a su capacidad para modelar y resolver problemas complejos con restricciones lineales y objetivos claros.

2.1.4.1. Fundamentos de la programación lineal entera

La programación lineal entera consiste en resolver problemas de optimización donde la función objetivo y las restricciones son lineales, pero las variables de decisión están restringidas a ser números enteros. Los problemas de PLE pueden clasificarse en dos categorías: PLE pura, donde todas las variables de decisión deben ser enteras, y PLE mixta, donde algunas variables de decisión pueden ser continuas y otras enteras.

2.1.4.2. Modelado de problemas con programación lineal entera

El modelado de problemas con PLE implica tres componentes principales:

- **Variables de decisión:** Estas representan las decisiones que se deben tomar en el problema, como asignar recursos, planificar la producción o seleccionar rutas. Las variables de decisión en un problema de PLE están restringidas a ser enteras.
- **Función objetivo:** Es una función lineal que representa el objetivo del problema, como maximizar la ganancia, minimizar los costos o reducir el tiempo de entrega. La función objetivo se construye utilizando las variables de decisión y sus coeficientes correspondientes.
- **Restricciones:** Estas representan las limitaciones del problema, como restricciones de capacidad, demanda, tiempo o recursos. Las restricciones en un problema de PLE son ecuaciones o desigualdades lineales que involucran las variables de decisión.

2.1.4.3. Solución de problemas de programación lineal entera. Resolver problemas de PLE puede ser más desafiante que resolver problemas de PL, ya que la naturaleza entera de las variables de decisión puede hacer que el espacio de soluciones sea no continuo y, a menudo, más grande. Existen varios métodos para resolver problemas de PLE, incluidos:

- **Método de ramificación y acotamiento (branch and bound):** Este método consiste en dividir el problema en subproblemas más pequeños y explorar el espacio de soluciones de manera sistemática utilizando límites superiores e inferiores para identificar soluciones óptimas.
- **Método de planos cortantes (cutting plane):** Este método se basa en agregar restricciones adicionales al problema (llamadas planos cortantes) que eliminan soluciones fraccionarias no deseadas sin afectar las soluciones enteras factibles.

- Métodos heurísticos: Estos métodos proporcionan soluciones aproximadas a problemas de PLE difíciles de resolver, mediante la exploración del espacio de soluciones utilizando reglas simples y de fácil desarrollo e implementación.

2.1.4.4. Aplicaciones de la programación lineal entera. La PLE se aplica en una amplia variedad de campos y problemas, incluyendo:

- Planificación de la producción y asignación de recursos
- Planificación de la producción y asignación de recursos
- Planificación y programación de proyectos
- Diseño y optimización de redes de transporte y logística
- Asignación de personal y programación de turnos de trabajo
- Optimización de inversiones y carteras financieras
- Gestión y asignación de recursos energéticos
- Diseño de sistemas de comunicación y distribución de información
- Asignación de tareas en sistemas de manufactura y robótica

2.1.4.5. Software LINGO. Lingo es un software de optimización matemática desarrollado por LINDO Systems Inc., utilizado para resolver problemas de programación lineal entera, programación lineal y no lineal, y problemas de optimización en general. Lingo proporciona un entorno de modelado intuitivo y fácil de usar para definir y resolver problemas de optimización matemática complejos.

El software Lingo permite a los usuarios definir problemas de programación lineal entera mediante la especificación de funciones objetivo, restricciones y variables. Lingo admite una amplia variedad de funciones y operadores matemáticos, lo que facilita la formulación de modelos matemáticos de problemas del mundo real.

Una vez que se ha definido el modelo matemático, Lingo utiliza algoritmos de optimización avanzados para encontrar soluciones óptimas o subóptimas. Estos algoritmos incluyen el método simplex, el método de barrera, y el método de ramificación y

acotamiento, entre otros. Lingo también ofrece funciones para analizar la sensibilidad y realizar análisis post-optimización.

El software Lingo es ampliamente utilizado en diversos campos, como la logística, la producción, la gestión de la cadena de suministro, la ingeniería y las finanzas, para optimizar el uso de recursos y mejorar la eficiencia y rentabilidad de las operaciones. Lingo es compatible con sistemas operativos Windows y ofrece una interfaz de usuario gráfica, así como una interfaz de programación de aplicaciones (API) para la integración con otros programas y lenguajes de programación.

En resumen, Lingo es un software de optimización matemática que proporciona un entorno de modelado fácil de usar para definir y resolver problemas de programación lineal entera y otros tipos de problemas de optimización. Con algoritmos de optimización avanzados y amplias capacidades de análisis, Lingo es una herramienta valiosa en una amplia gama de aplicaciones y campos.

Por lo tanto, la programación lineal entera es una herramienta poderosa y versátil en la optimización matemática que permite modelar y resolver problemas de decisión con restricciones lineales y variables de decisión enteras. A través de diversos métodos de solución y aplicaciones en diferentes campos, la PLE ha demostrado ser una metodología eficaz para abordar problemas de optimización complejos y encontrar soluciones óptimas en situaciones reales.

2.2. Marco conceptual

2.2.1. Programación lineal entera:

La programación lineal entera es una técnica matemática utilizada para optimizar la asignación de recursos limitados para maximizar o minimizar una función objetivo. En el contexto de la minería, la programación lineal entera se puede utilizar para optimizar la asignación de operadores polifuncionales a las actividades de perforación de acuerdo con ciertos criterios y restricciones.

2.2.2. Mina de cobre a tajo abierto

Una mina de cobre a tajo abierto es un tipo de operación minera en la que se extrae cobre a partir de grandes depósitos de mineral a través de la excavación de un tajo o foso en la tierra. Este tipo de operación minera se caracteriza por su alto rendimiento, bajo costo y gran impacto ambiental.

2.2.3. Operadores polifuncionales:

Los operadores polifuncionales son aquellos trabajadores que pueden realizar múltiples tareas y funciones en una mina, como perforar, cargar y transportar material, y realizar mantenimiento en equipos y maquinaria. La asignación de operadores polifuncionales puede ser más eficiente que la asignación de operadores especializados, ya que se reduce el tiempo de inactividad entre tareas y se mejora la utilización de los recursos humanos.

2.2.4. Productividad

La productividad se refiere a la cantidad de bienes o servicios producidos por unidad de tiempo o unidad de recurso. En el contexto de la minería, la productividad se puede medir en términos de metros perforados por hora o por día, o en términos de toneladas de mineral extraídas por hora o por día.

2.2.5. Optimización

La optimización se refiere al proceso de maximizar o minimizar una función objetivo sujeta a ciertas restricciones y limitaciones. En el contexto de la minería, la optimización se puede utilizar para maximizar la productividad, minimizar los costos, reducir el impacto ambiental y mejorar la seguridad laboral.

2.2.6. Restricciones y criterios de asignación

Las restricciones y criterios de asignación son las condiciones y limitaciones que deben cumplirse para asignar operadores polifuncionales de manera óptima a las actividades de perforación. Estos criterios pueden incluir la experiencia del operador, la disponibilidad de maquinaria, el estado del equipo, la ubicación geográfica de la actividad de perforación, entre otros.

2.3. Hipótesis y operacionalización de variables

2.3.1. Hipótesis

2.3.1.1. Hipótesis general

¿Incrementará la aplicación de un modelo de programación lineal entera la producción de metros perforados y mejorará la eficiencia de las operaciones mineras en una mina de cobre a tajo abierto?

2.3.1.2. Hipótesis secundarias

- ¿Permitirá el modelo de programación lineal entera que considera las habilidades y restricciones de los operadores polifuncionales y las características operativas de la mina obtener una asignación de operadores que maximice la producción de metros perforados?
- ¿Es robusto el modelo de programación lineal entera para la asignación óptima de operadores polifuncionales en una mina de cobre a tajo abierto frente a cambios en los parámetros clave y las condiciones operativas, permitiendo mantener la optimización de los metros perforados de producción incluso en escenarios de variabilidad?

2.3.2. Operacionalización de variables

Para analizar y comprobar las hipótesis planteadas, es necesario identificar y definir las variables involucradas en el estudio. A continuación, se presenta la operacionalización de las variables:

2.3.2.1. Variable independiente: Asignación óptima de operadores polifuncionales: Proceso de asignación de operadores polifuncionales a las perforadoras en la mina de cobre a tajo abierto, teniendo en cuenta las habilidades, restricciones y características operativas, con el objetivo de maximizar la producción de metros perforados.

Indicadores:

- Número de operadores polifuncionales disponibles.

- Habilidades y restricciones de los operadores polifuncionales.
- Características operativas de la mina y las perforadoras.

2.3.2.2. Variable dependiente: Incremento en la producción de metros perforados y mejora de la eficiencia: Aumento en la producción de metros perforados y mejora en la eficiencia de las operaciones mineras a partir del desarrollo de la asignación óptima de operadores polifuncionales en la mina de cobre a tajo abierto.

Indicadores:

- Metros perforados totales en la mina.
- Eficiencia en la utilización de recursos humanos y materiales.
- Rentabilidad de las operaciones mineras.

2.4. Metodología de la investigación

2.4.1. Tipo y diseño de investigación

La investigación es de tipo cuantitativo y de diseño no experimental, ya que se utilizarán datos recolectados de la mina y se analizarán mediante un modelo matemático de programación lineal entera para optimizar la asignación de operadores polifuncionales y mejorar la producción de metros perforados.

2.4.2. Unidad de análisis

2.4.2.1. Geología regional. El yacimiento de cobre modelo pertenece a la Franja de Pórfidos y Skarns de Cu-Mo (Au, Zn) y depósitos de Cu-Au-Fe asociados con intrusiones del Eoceno-Oligoceno, situado entre la Cordillera Occidental y el Altiplano en las regiones de Ayacucho, Apurímac, Cusco y Puno.

La mineralización está vinculada a granitoides, dioritas y granodioritas del Batolito Andahuaylas-Yauri del Eoceno-Oligoceno, emplazadas en condiciones transpresionales y controladas por los sistemas de fallas Urcos-Sicuani-Ayaviri, Cusco-Lagunillas-Mañazo, Abancay-Andahuaylas-Totos-Chincheros-Licapa y Abancay-Condorama-Caylloma. Las intrusiones intermedias a ácidas se relacionan con la mineralización de Cu-Mo (Au), y en

el contacto con secuencias carbonatadas del Albiano-Turoniano, desarrollan cuerpos de skarn de Cu-Zn.

Las intrusiones más básicas se asocian con las mineralizaciones de Fe-Cu-Au, que se presentan en forma de cuerpos en contacto con secuencias carbonatadas del Albiano-Turoniano y vetas principalmente de Au-Cu en las intrusiones.

La mineralización de cobre de la mina modelo se encuentra principalmente en los contactos de las calizas de la formación en estudio y las rocas intrusivas de la era Terciaria (granodiorita, cuarzo monzonita y cuarzo diorita).

El aspecto estructural más destacado es el intenso plegamiento inarmónico de las calizas de la formación en estudio, que se encuentra sobre las formaciones Hualhuani y Mara, acompañado de deslizamientos y fallas inversas. También se observan fallas menores de diferentes direcciones y desplazamientos limitados que atraviesan las distintas unidades litológicas.

2.4.2.2. Geología local. La litología y estratigrafía de la zona se caracteriza por una espesa secuencia sedimentaria con una unidad inferior compuesta por areniscas (Fm. Soraya - Jurásico superior a Cretácico inferior), seguida de una unidad de limolitas y areniscas (Fm. Mara - Cretáceo inferior), que transita hacia una unidad claramente calcárea (Formación en estudio - Cretáceo medio), conformada por horizontes de calizas masivas, calizas con chert, calizas bioclásticas y calizas contaminadas con clásticos finos.

Se encuentran formaciones cuaternarias, como los volcánicos piroclásticos que afloran en las laderas del río local y en otras quebradas situadas en la parte sur, así como morrenas y sedimentos fluvio-glaciales localizados en diferentes áreas del proyecto.

En el distrito se han identificado diversas fases magmáticas, comenzando con una fase diorítica seguida de una granodiorítica, ambas de alcance regional, y cortadas en varios sectores por diferentes fases locales de monzonitas, además de diques tardíos de latita y otros. Las distintas fases de monzonitas, identificadas al menos en las tres áreas principales, presentan características de textura y composición moderadamente diferentes,

pudiendo distinguirse cada una de estas fases, principalmente por contactos, por algún mineral característico y por su asociación con cuerpos de skarn y/o mineralización de Cu.

2.4.2.3. Rocas sedimentarias. Solamente afloran las calizas en la esquina noreste del yacimiento.

2.4.2.4. Rocas intrusivas. Aparecen en forma de apófisis y diques dentro del cuerpo principal de hornfels y skarn, y como una masa continua, limitando el yacimiento hacia los extremos este, oeste y sur del área.

2.4.2.5. Geología del yacimiento. Las calizas pertenecen a la Era Cretácica, similar a los depósitos de skarn en Tintaya, Antamina y Magistral.

La mineralización más común es la calcopirita, que contiene oro y plata asociados al cobre. La mineralización se distribuye en bloques fallados de granate y magnetita en skarn.

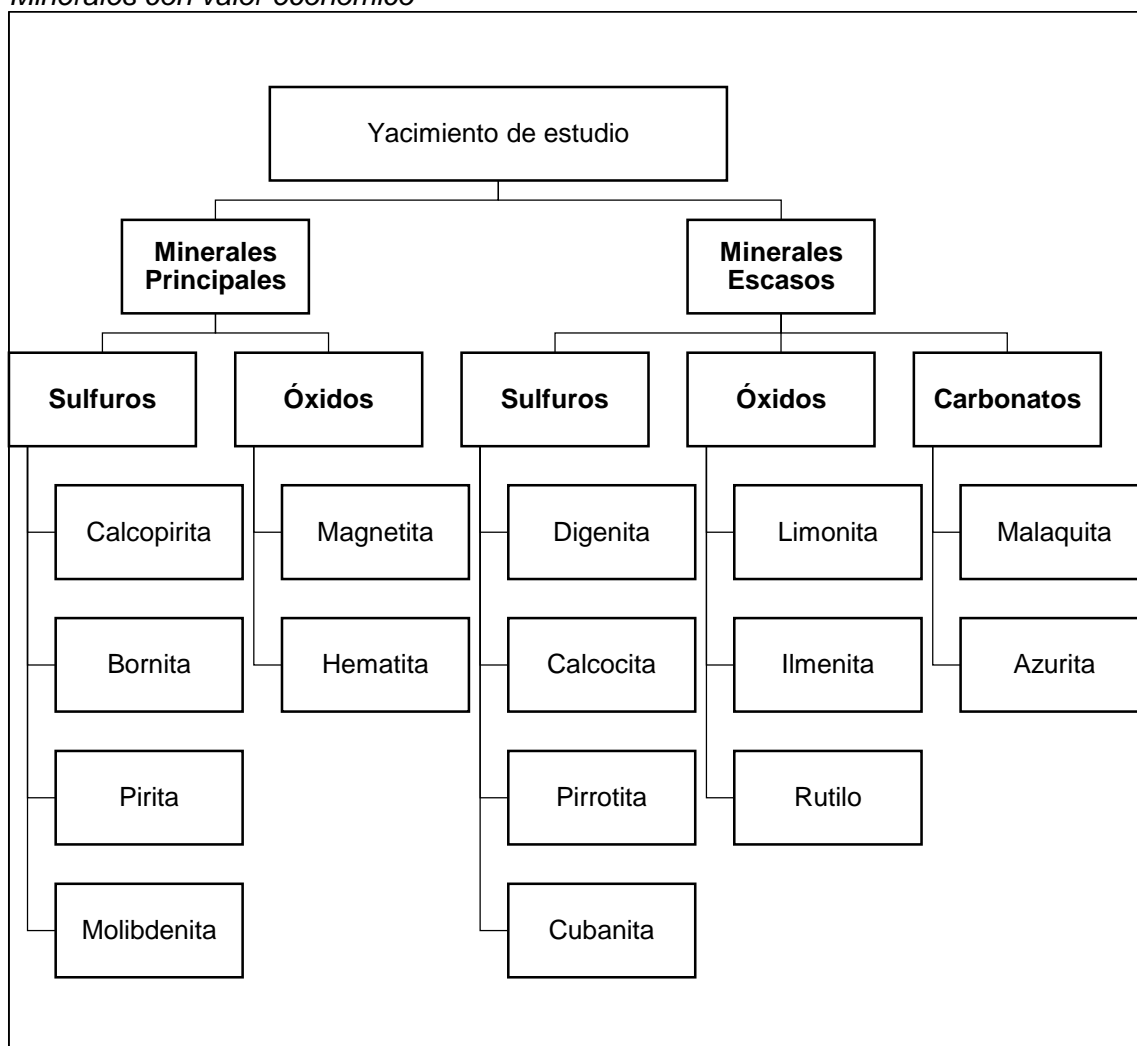
Las rocas con alteración potásica y silicificación presentan calcopirita diseminada. La mineralización de enriquecimiento secundario es escasa debido a la intensa erosión glacial y a la densidad del skarn.

Las unidades litológicas ígneas y sedimentarias que afloran en el distrito minero consisten en las formaciones Hualhuani, Mara y la unidad en estudio, cuyas edades abarcan desde el Jurásico Superior hasta el Cretácico Superior. A pesar de que se han encontrado varios minerales metálicos en el yacimiento, solamente algunos de ellos ocurren en cantidades económicamente significativas y casi exclusivamente en el cuerpo de skarn.

2.4.2.6. Geología económica

Figura 10

Minerales con valor económico



Fuente: Elaboración Propia

2.4.2.7. Población y muestra

La población de estudio está conformada por la mina de cobre a tajo abierto, sus operadores polifuncionales y las perforadoras disponibles. La muestra incluirá información sobre la cantidad de operadores polifuncionales, sus habilidades y restricciones, las características de las perforadoras y las restricciones operativas de la mina.

2.4.3. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Se utilizarán diversas técnicas para recolectar los datos necesarios para el estudio, como la revisión documental de registros y archivos de la mina, entrevistas con personal clave y expertos en la materia, y observación directa de las operaciones mineras. Los

instrumentos de recolección de datos incluirán cuestionarios, listas de verificación y formatos de registro.

2.4.4. Procedimiento de investigación

El procedimiento de investigación se desarrollará en las siguientes etapas:

- Revisión bibliográfica y documental: Se revisarán estudios previos, documentos y publicaciones relacionadas con la optimización de la asignación de operadores polifuncionales en la industria minera, así como las teorías y conceptos fundamentales de programación lineal entera.
- Recopilación y análisis de datos: Se recolectarán y organizarán los datos pertinentes sobre la mina, los operadores polifuncionales, las perforadoras y las restricciones operativas, utilizando las técnicas e instrumentos de recolección de datos mencionados anteriormente.
- Desarrollo del modelo de programación lineal entera: Con base en los datos recolectados y el marco teórico, se definirán las variables y parámetros del modelo y se formulará el problema de programación lineal entera, considerando las restricciones y características operativas de la mina.
- Resolución del modelo y obtención de resultados: Se resolverá el modelo de programación lineal entera utilizando software de optimización, obteniendo la asignación óptima de operadores polifuncionales a las perforadoras en función de las restricciones y condiciones de la mina.
- Análisis de resultados y sensibilidad: Se analizarán los resultados obtenidos y se llevará a cabo un análisis de sensibilidad para evaluar cómo los cambios en los parámetros afectan la solución óptima y para identificar posibles mejoras en la asignación de recursos o áreas donde la mina podría ser más eficiente.
- Elaboración de conclusiones y recomendaciones: Con base en el análisis de resultados, se elaborarán las conclusiones y recomendaciones pertinentes para mejorar la eficiencia y rentabilidad de las operaciones mineras en la mina

de cobre a tajo abierto a través de la optimización de la asignación de operadores polifuncionales mediante programación lineal entera.

- Redacción del informe final de la tesis: Se redactará el informe final de la tesis, incluyendo la introducción, el marco teórico, las hipótesis y operacionalización de variables, la metodología de investigación, los resultados y análisis, las conclusiones y recomendaciones, y las referencias bibliográficas.

Una vez finalizado el proceso de investigación, se espera que la tesis contribuya al conocimiento y la práctica en la industria minera, proporcionando herramientas y enfoques para optimizar la asignación de operadores polifuncionales y mejorar la eficiencia y rentabilidad de las operaciones mineras en minas de cobre a tajo abierto.

2.4.5. Matriz de consistencia

Título: Optimización de los metros perforados de producción mediante la asignación de operadores polifuncionales aplicando programación lineal entera, en una mina de cobre a tajo abierto.

Tabla 1

Matriz de consistencia

Problema	Objetivos	Hipótesis	Variables		Indicadores
			Independiente	Dependiente	
¿De qué manera la aplicación de un modelo de programación lineal entera para la asignación óptima de operadores polifuncionales en una mina de cobre a tajo abierto puede incrementar la producción de metros perforados y mejorar la eficiencia de las operaciones mineras?	Desarrollar y aplicar un modelo de programación lineal entera para optimizar la asignación de operadores polifuncionales en una mina de cobre a tajo abierto, con el fin de incrementar la producción de metros perforados y mejorar la eficiencia de las operaciones mineras.	¿Incrementará la aplicación de un modelo de programación lineal entera la producción de metros perforados y mejorará la eficiencia de las operaciones mineras en una mina de cobre a tajo abierto?	Asignación óptima de operadores polifuncionales	Incremento en la producción de metros perforados y mejora de la eficiencia	<ul style="list-style-type: none"> - Número de operadores polifuncionales disponibles. - Habilidades y restricciones de los operadores polifuncionales. - Características operativas del tipo de roca y las perforadoras.

Fuente: Elaboración Propia

Capítulo III. Desarrollo del trabajo de investigación

3.1. Recolección de datos

3.1.1. Diagnóstico de la flota de perforación

El diagnóstico de los equipos de perforación de la mina de cobre de tajo abierto, que son los equipos cuya función es la perforación de taladros de producción de mineral y desmonte con diámetros de 12 ¼" de diámetro y una profundidad de hasta 18 metros. La flota está conformada por 10 perforadoras rotativas (ver tabla II), de las cuales 3 son de la marca P&H modelo 320 XPC, 4 de la marca CAT modelo MD 6640 y 3 son de la marca Pit Viper modelo PV 351D.

Tabla 2

Equipos de Perforación

Perforadora	Marca	Modelo
Perforadora 1	P&H	320 XPC
Perforadora 2	P&H	320 XPC
Perforadora 3	P&H	320 XPC
Perforadora 4	CAT	MD6640
Perforadora 5	CAT	MD6640
Perforadora 6	CAT	MD6640
Perforadora 7	CAT	MD6640
Perforadora 8	PIT VIPER	PV 351D
Perforadora 9	PIT VIPER	PV 351D
Perforadora 10	PIT VIPER	PV 351D

Fuente: Elaboración Propia

3.1.2. Diagnóstico de la clasificación de los tipos de roca

El diagnóstico de la clasificación de la dureza de la roca es fundamental para optimizar el proceso de perforación y mejorar la eficiencia en la operación minera. La dureza de la roca afecta directamente la velocidad de perforación, el desgaste de los equipos y la selección de la técnica de perforación y voladura. A continuación, se presenta un diagnóstico de la clasificación de la dureza de la roca en una mina de cobre a tajo abierto en función resistencia a la compresión uniaxial de la roca (ver Tabla 3).

Tabla 3

Rangos de UCS según la dureza

Dureza	UCS
Suave	<0 - 100>
Medio	<100 - 140>
Duro	<140 - 180>
Muy Duro	<180 - ∞>

Fuente: Elaboración Propia

La clasificación de la dureza de la roca en la mina de cobre se realiza empleando la fórmula de R. Praillet 1978 (Ver Figura 11) la cual relaciona la resistencia a la compresión uniaxial, pulldown, RPM, velocidad de penetración y diámetro de perforación.

R. Praillet en 1978 dedujo la siguiente fórmula empírica (ver Tabla 11):

Figura 11

Formula de Preillet para calcular la velocidad de penetración

$$VP = \left(\frac{63.9 * E * Nr}{RC^2 * D^{0.9}} \right)$$

(1)

Fuente. Adaptado de Manual de Perforación y Voladura de Rocas, López J., 2003, Madrid, España: Instituto Tecnológico Geominero

Donde:

VP = Velocidad de penetración (metros/horas)

E = Empuje (Kg)

Nr = Velocidad de rotación (revoluciones/min) .

RC = Resistencia a la compresión de la roca (Mpa)

D = Diámetro de la broca tricónica (mm).

3.1.3. Diagnóstico de la disponibilidad, uso de la disponibilidad y eficiencia operativa.

El diagnóstico de la disponibilidad, uso de la disponibilidad y eficiencia operativa de las perforadoras rotativas es fundamental para optimizar el proceso de perforación y mejorar la productividad en la operación minera (ver Anexo 1). A continuación, se presenta un diagnóstico de estos aspectos en las perforadoras rotativas utilizadas en una mina de cobre a tajo abierto, para realizar los cálculos de la disponibilidad, uso de la disponibilidad y eficiencia operativa de debe tener en cuenta el siguiente cuadro del modelo de tiempos:

Tabla 4

Modelo de tiempos de la mina de cobre

Tiempo calendario					
Tiempo disponible			Pérdida del equipo		
Tiempo operativo		Pérdida del proceso		Planificada	No Planificada
Tiempo Productivo	Tiempo no productivo	Demora operacional programada	Demora no programada standby	Pérdida del equipo planificada	Pérdida del equipo no planificada

Fuente: Elaboración Propia

Se recopilan datos sobre las perforadoras rotativas, incluyendo horas de operación, tiempos de inactividad, mantenimientos realizados, velocidad de perforación y desgaste de los equipos.

Entre las principales descripciones de estados tenemos:

Tiempo productivo:

- Operativo Apoyo proyectos
- Operativo Con restricción mecánica
- Operativo Entrenamiento
- Operativo Entrenamiento autónomo

- Operativo Perforando sin GPS
- Operativo Producción
- Operativo Reperforando
- Operativo Terreno duro
- Operativo Terreno suave

Tiempo no productivo:

- Trabajos auxiliares
- Traslado corto
- Traslado largo

Demora operacional programada

- Abastecimiento de aceros y accesorios
- Abastecimiento de agua
- Cambio de accesorios de perforación
- Cambio de operador
- Cambio de turno
- Comb. con cisterna
- Espera para abastecer
- Inspección
- Levantar o bajar mástil
- Limpieza de equipo/cabina
- Lubricación de barra
- Maniobra de cables
- Refrigerio
- Relleno de aceite lubricación de broca
- Retorno después de voladura
- Salida por voladura
- SSHH

- Traslado en camabaja
- Voladura

Demora no programada Standby

- Atasco de broca/barra
- Clima severo
- Condiciones inseguras
- Equipo no requerido
- Esperando camabaja por traslado
- Esperando escolta
- Esperando limpieza de área
- Falta área de perforación
- Falta de agua
- Falta de combustible
- Falta de malla
- Falta marcas topográficas
- Falta operador
- Interrupción por tormenta
- Parada por seguridad
- Perforadora sin energía
- Por pruebas entrenamiento
- Problemas sociales

Perdida del equipo planificada

- Backlogs
- Cambio de componentes
- PM
- Servicio

Perdida del equipo no planificada

- Cabina
- Chasis y estructura
- Clima severo
- Control de implementos
- Control de movimiento
- Crowd/hydra crowd
- Demora externa a mantenimiento
- Eléctrico 24 V
- Evento operacional
- Falta de Energia por mantenimiento
- Lubricación
- Mando eléctrico y control
- Maquina
- Mástil
- Motor diesel
- Prob dispatch red GPS radio
- Sistema de aire
- Sistema de control
- Sistema de potencia
- Transmisión
- Tren de mando
- Unidad de potencia

Disponibilidad

Se refiere a la proporción de tiempo en que un sistema o equipo está en condiciones de ser utilizado o está operativo. Es una métrica comúnmente usada para evaluar la eficiencia y la fiabilidad de las máquinas, especialmente en contextos de producción y mantenimiento.

Este es el porcentaje del tiempo calendario en que el equipo estuvo físicamente disponible para trabajar. Medida del tiempo que el equipo está disponible para realizar su función prevista. La disponibilidad mide el impacto que tiene la pérdida planificada y no planificada del equipo en el rendimiento del equipo.

$$\text{Disponibilidad (\%)} = \frac{\text{Tiempo disponible}}{\text{Tiempo calendario}}$$

Uso de la disponibilidad

Se refiere a la medida en que los equipos mineros se utilizan durante un período determinado respecto al tiempo disponible.

Este es el porcentaje del tiempo disponible que se utiliza para actividades operativas (perforación, posicionamiento entre taladros, traslados cortos y largos por sus propios medios). Mide la capacidad de los equipos operativos para utilizar el equipo cuando está disponible.

$$\text{Uso de la disponibilidad (\%)} = \frac{\text{Tiempo de operativo}}{\text{Tiempo disponible}}$$

Eficiencia operativa

Es el porcentaje del tiempo operativo en el cual las perforadoras están realizando la actividad de perforando, incluyendo los posicionamientos entre taladros.

$$\text{Eficiencia operativa} = \frac{\text{Tiempo productivo}}{\text{Tiempo operativo}}$$

3.1.4. Diagnóstico de la velocidad de perforación

Se llevó a cabo un análisis exhaustivo de los taladros perforados a lo largo del año 2021 y 2022. El informe consolidado que comprende los detalles específicos de cada taladro fue extraído del sistema de gestión de la mina de cobre. Dicha base de datos incluye elementos tales como el identificador del operador, el código de las máquinas perforadoras, la profundidad alcanzada, el tiempo requerido para la perforación, la dureza del material perforado, entre otros factores relevantes.

3.1.5. Diagnóstico del plan de perforación

Dentro del esquema de perforación establecido para el periodo de un año para la mina de cobre, se pueden identificar diversos factores, como el metraje proyectado a perforar por tipo de dureza de roca durante los meses del año. Estos elementos nos permitirán calcular la distribución en porcentaje de la dureza de roca para el año de proyección (consulte el Anexo 2 para obtener más información).

3.2. Procesamiento de la información

3.2.1. Procesamiento de la velocidad de perforación

Se realizó el procesamiento de la información mediante hojas de cálculo Excel y el software Minitab. Se consideró los años 2021 y 2022 para el análisis, para identificar las velocidades de perforación por dureza de roca para los perforistas (ver Anexo 3) considerando un nivel de confianza del 90% y un mínimo de 10 registro por tipo de dureza. Las velocidades de perforación promedio total se resumen en la Tabla 5.

Tabla 5

Promedio de la velocidad de perforación por dureza de roca

Dureza de la roca	Velocidad de perforación (m/hr)
Suave	40.3
Medio	39.4
Duro	32.5
Muy Duro	26.9
Promedio	33.1

Fuente: Elaboración Propia

3.2.2. Procesamiento de la disponibilidad, utilización y eficiencia operativa de las perforadoras rotativa

Se realizó el procesamiento de la información mediante hojas de cálculo Excel y el software Minitab. Se consideró el periodo de un año, para calcular la disponibilidad, uso de la disponibilidad y eficiencia operativa según el plan de perforación, con la información de la Anexo 1, así como el tiempo operativo promedio para un día de trabajo de 24 horas como se detalla en la Tabla 6.

Tabla 6*Indicadores de operativos*

Perforadora	Disponibilidad	Uso de la Disponibilidad	Eficiencia Operativa	Tiempo Productivo en 24 horas
Perforadora 01	89.6%	75.6%	93.0%	15.1
Perforadora 02	82.9%	75.4%	93.0%	13.9
Perforadora 03	88.8%	75.8%	93.0%	15.0
Perforadora 04	89.5%	75.5%	93.0%	15.1
Perforadora 05	90.0%	75.6%	93.0%	15.2
Perforadora 06	88.3%	75.6%	93.0%	14.9
Perforadora 07	88.3%	75.4%	93.0%	14.8
Perforadora 08	88.4%	77.4%	93.0%	15.3
Perforadora 09	87.1%	77.4%	93.0%	15.0
Perforadora 10	87.4%	77.7%	93.0%	15.2

Fuente: Elaboración Propia

El tiempo productivo promedio para 24 horas de trabajo se empleará junto a la velocidad de perforación promedio de los operadores, se calculará el metraje promedio diario para cada perforista.

3.2.3. Procesamiento del plan de perforación

Se realizó el procesamiento de la información del ANEXO 2 mediante hojas de cálculo Excel y el software Minitab. Se consideró el periodo de un año, para calcular la distribución del metraje planeado por tipo de dureza de roca que se resumen en la Tabla 7

Tabla 7*Distribución de tipos de dureza de roca*

Periodo	Metros Planeados				Porcentaje			
	Suave	Medio	Duro	Muy Duro	Suave	Medio	Duro	Muy Duro
Mes 01	18	15,804	108,555	17,824	0%	11%	76%	13%
Mes 02	17	15,320	116,675	17,326	0%	10%	78%	12%
Mes 03	14	12,606	104,161	14,080	0%	10%	80%	11%
Mes 04	17	15,307	125,258	17,129	0%	10%	79%	11%
Mes 05	17	15,632	119,696	17,418	0%	10%	78%	11%
Mes 06	14	13,011	100,822	14,520	0%	10%	79%	11%
Mes 07	17	15,513	117,882	17,466	0%	10%	78%	12%
Mes 08	17	14,816	124,218	16,622	0%	10%	80%	11%
Mes 09	14	12,361	111,680	13,897	0%	9%	81%	10%
Mes 10	15	13,520	119,313	15,203	0%	9%	81%	10%
Mes 11	16	14,304	112,255	15,951	0%	10%	79%	11%

Mes 12	16	14,525	110,501	16,248	0%	10%	78%	11%
Total, general	192	172,720	1,371,014	193,685	0%	10%	79%	11%

Fuente: Elaboración Propia

Por otro lado, En función a las horas planificadas de funcionamiento de las perforadoras por mes del Anexo 1 y la velocidad de perforación promedio de la Tabla 5, se detalla los metros estimados de perforación en la Tabla 8.

Tabla 8

Metros estimados de perforación

MES	DIAS	HORAS	Vel. Perfo. Promedio	Metros estimados de Perforación
Mes 01	30	4,778.61	33.1	158,394
Mes 02	31	4,786.81	33.1	158,666
Mes 03	30	4,146.15	33.1	137,430
Mes 04	31	5,025.16	33.1	166,566
Mes 05	31	4,722.62	33.1	156,538
Mes 06	30	4,146.88	33.1	137,455
Mes 07	31	4,455.69	33.1	147,690
Mes 08	30	4,646.71	33.1	154,022
Mes 09	31	4,310.38	33.1	142,874
Mes 10	31	4,623.54	33.1	153,254
Mes 11	29	4,408.59	33.1	146,129
Mes 12	31	4,700.61	33.1	155,809
TOTAL	366	54,752	33.1	1,814,828

Fuente: Elaboración Propia

3.3. Análisis de los metros perforados por los perforistas

En el Anexo 4 se muestra los metros perforados promedios de los perforistas por perforadora calculados en función a las horas productivas en 24 horas de trabajo y la velocidad de perforación promedio calculada a partir de las velocidades de perforación por tipo de dureza de roca y la distribución de por tipo de dureza de roca proyectada para el periodo de un año, que se resumen en el Anexo 3.

3.3.1. Propuesta de modelo de programación lineal entera

Para el desarrollo del modelo de programación lineal entera para maximizar los metros perforados se ha considerado 10 perforadoras, 63 perforistas, 4 guardias de trabajo (sistema 10x10), por cada perforadora solo se pueden seleccionar 4 perforistas, cada

operador solo puede estar asignado a una perforadora, para el cálculo de los metros perforados por cada operador según la perforadora se ha calculado la horas productivas promedio por día de cada perforadora y se ha multiplicado por la velocidad de perforación promedio que se ha promediado mediante el promedio ponderado del porcentaje de cada tipo de dureza de roca del plan del periodo de un año y la velocidad de perforación de cada operador según la perforadora y el tipo de dureza de roca.

Variables de decisión:

X_{ijk} : 1 si el operador i es asignado a la perforadora j en la guardia k , 0 en caso contrario, para:

$$i = 1, \dots, n;$$

$$j = 1, \dots, m$$

$$k = 1, \dots, p.$$

Indicador de Productividad:

C_{ij} es los metros perforados por día del operador i en la perforadora j .

Función objetivo:

Maximizar los metros perforados de la mina de cobre:

$$\text{Maximizar } Z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^p C_{ij} * X_{ijk}$$

Restricciones:

- El número máximo de operadores seleccionados debe ser $m \cdot p$ (número de perforadoras por número de guardias)

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^p X_{ijk} \leq m * p$$

- Por cada guardia el número máximo de operadores debe ser m (número de perforadoras)

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m X_{ijk} \leq m \quad \text{para cada } k = 1, \dots, p$$

- El número máximo de operadores por perforadora debe ser p (número de guardias)

$$\sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^p X_{ijk} \leq m \quad \text{para cada } j = 1, \dots, m$$

- Cada operador solo puede ser o no asignado a una perforadora

$$\sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^p X_{ijk} \leq 1 \quad \text{para cada } i = 1, \dots, n$$

- La variable de decisión solo puede tomar valores de 0 ó 1

$$X_{ijk} = 0 \text{ ó } 1$$

El código de programación comentado para maximizar los metros perforados por día en el software Lingo que se detalla en el Anexo 5. En la Tabla 9 se detalla los 40 operadores seleccionados para maximizar la función objetivo.

Tabla 9

Operadores seleccionados (40) para maximizar la función Objetivo

Operador	Perforadora	Seleccionado	Valor	Guardia
7	1	1	-645	1
15	1	1	-599	2
35	1	1	-636	3
34	1	1	-623	4
25	2	1	-530	1
18	2	1	-555	2
56	2	1	-534	3
17	2	1	-534	4
60	3	1	-596	1
55	3	1	-739	2
44	3	1	-597	3
63	3	1	-623	4
48	4	1	-452	1
36	4	1	-425	2
24	4	1	-500	3
45	4	1	-446	4
26	5	1	-565	1
39	5	1	-440	2
21	5	1	-445	3
28	5	1	-485	4
52	6	1	-426	1
41	6	1	-457	2
51	6	1	-467	3

47	6	1	-500	4
6	7	1	-427	1
49	7	1	-411	2
43	7	1	-478	3
53	7	1	-452	4
46	8	1	-634	1
32	8	1	-709	2
38	8	1	-628	3
9	8	1	-605	4
37	9	1	-652	1
23	9	1	-598	2
54	9	1	-608	3
12	9	1	-684	4
42	10	1	-606	1
4	10	1	-594	2
40	10	1	-615	3
10	10	1	-592	4

Fuente: Elaboración Propia

De los resultados de la Tabla 9 la función objetivo se maximiza con 22,112 metros por día que equivale a la suma de los metros diarios de las 4 guardias, por lo cual al dividir entre 4 obtenemos el promedio diario de los metros perforados es 5,528 metros por día en promedio, este promedio no considera el ausentismo del personal.

Para la distribución de los 23 perforistas restantes se aplicó el modelo de programación lineal entera teniendo como restricciones 2 perforadoras por modelo (P&H 320XPC, CAT MD6640 y PV 351D) y 4 guardias. En la Tabla 10 se detalla los operadores que han sido seleccionados.

Tabla 10

Distribución de operadores según modelo de perforadora

Operador	Perforadora	Seleccionado	Valor	Guardia
14	1	1	-515	4
19	1	1	-556	3
5	1	1	-547	2
13	1	1	-531	1
31	2	1	-363	3
62	2	1	-361	2
1	2	1	-386	4
57	2	1	-380	1
3	3	1	-526	1
50	3	1	-487	4

58	3	1	-554	2
29	3	1	-565	3
20	4	1	-519	2
2	4	1	-520	1
22	4	1	-542	4
11	4	1	-497	3
33	5	1	-394	1
30	5	1	-391	3
16	6	1	-500	3
59	6	1	-482	2
8	6	1	-497	1
61	6	1	-533	4

Fuente: Elaboración Propia

De la Tabla 10 se observó que solo fueron seleccionados 22 operadores, asimismo el operador 27 no fue asignado, sin embargo, se asignado a la guaria 2. Por otro lado, el criterio utilizado para asignar las guardias es la reducción de la varianza de los metros perforados entre las guardias.

3.3.2. Análisis de sensibilidad en función del ausentismo de personal

El análisis de sensibilidad se centra en el ausentismo de personal dado que por diversos motivos no asisten al laborar como por ejemplo por vacaciones, descanso médico, permiso, problemas para llegar a la mina entre otros. Asimismo, se observó que el 10% de las guardias de trabajo o subidas a trabajar a mina se tiene 0 ausentismo, el 50% se tiene un ausentismo, el 25% se tiene 2 ausentismos y el 15% se tiene 3 ausentismos, en tal sentido a cada mes del año se calculó el número de ausentismo tomando en cuenta la distribución antes descrita aplicando números aleatorios y realizando 3 escenarios simulados.

Para cada guardia de trabajo se corrió el algoritmo del Software Lingo detallado en el Anexo 5 con las siguientes observaciones, dado que se corrió por cada guardia el número de guardias se restringía una guardia, el número de perforadoras se mantuvo en 10 y el número de operadores se restringió según la guardia (G1:16 ; G2:16 ; G3:16 G4:15) descontando el número de ausentismos (0, 1, 2 y 3) para cada uno de los meses del año

los operadores considerados el ausentismo son los titulares seleccionados en la Tabla 9, para lo cual se desarrolló la tabla del Anexo 7.

Para el análisis de sensibilidad realizó 3 corridas aleatorias teniendo en cuenta la distribución de ausentismo. Asimismo, se empleó los cuadros de sensibilidad del Anexo 7 para calcular los cuadros de distribución de metros perforados por día del Anexo 8. Los 3 escenarios del Anexo 8 se resumen según la Tabla 11.

Tabla 11

Escenarios de optimizados de metros perforados considerando el ausentismo

MES	DIAS	ESCENARIO 01		ESCENARIO 02		ESCENARIO 03		PROMEDIO DE ESCENARIOS	
		Metros Por día	Metros Por Mes	Metros Por día	Metros Por Mes	Metros Por día	Metros Por Mes	Metros Por día	Metros Por Mes
01	30	5,809	174,278	5,765	172,958	5,744	172,328	5,773	173,188
02	31	5,609	173,864	5,598	173,523	5,629	174,484	5,612	173,957
03	30	4,945	148,350	4,974	149,213	5,010	150,293	4,976	149,285
04	31	5,813	180,195	5,835	180,877	5,751	178,266	5,799	179,779
05	31	5,455	169,090	5,440	168,640	5,520	171,128	5,472	169,619
06	30	5,010	150,300	4,933	147,998	4,977	149,303	4,973	149,200
07	31	5,227	162,022	5,202	161,262	5,221	161,836	5,216	161,706
08	30	5,613	168,398	5,645	169,358	5,579	167,363	5,612	168,373
09	31	5,038	156,178	5,077	157,395	5,078	157,410	5,064	156,994
10	31	5,443	168,741	5,436	168,524	5,425	168,175	5,435	168,480
11	29	5,476	158,804	5,476	158,804	5,509	159,754	5,487	159,121
12	31	5,510	170,795	5,505	170,647	5,503	170,601	5,506	170,681
TOTAL		64,947	1,981,012	64,886	1,979,197	64,944	1,980,937	64,926	1,980,382

Fuente: Elaboración Propia

Capítulo IV. Análisis y discusión de resultados

4.1. Análisis descriptivos de la investigación

En la Figura 12 los siguientes indicadores descriptivos referentes a la profundidad de los taladros y el tiempo de perforación.

Figura 12

Estadísticos descriptivos de la profundidad del taladro y el tiempo de perforación

Estadísticos descriptivos: Profundidad del Taladro; Tiempo Perforacion							
Estadísticas							
Variable	N	N*	Media	Error estándar de la media	MediaRec	Desv.Est.	Mínimo
Profundidad del Taladro	104056	0	16.134	0.00503	16.303	1.622	0.100
Tiempo Perforacion	104056	0	29.204	0.0306	28.607	9.863	-62.688
Variable	Q1	Mediana	Q3	Máximo	Asimetría	Curtosis	
Profundidad del Taladro	16.000	16.400	16.800	24.900	-3.85	20.92	
Tiempo Perforacion	22.877	27.838	33.826	578.037	4.59	170.26	

Fuente: Elaboración Propia

Del análisis realizado se observó que la profundidad media es 16.104 metros y el tiempo de perforación medio es de 29.204 minutos, en tal sentido la velocidad de perforación media calculada es 33.148 metros/hora de la base de datos de análisis.

Asimismo, debido a los valores positivos de la curtosis se tiene indica una concentración de datos en las colas de la distribución (distribución leptocúrtica), en tal sentido para el caso de estudio se va a utilizar con un nivel de confianza de 90% para eliminar los valores erráticos de las colas.

4.2. Prueba de hipótesis de la investigación

4.2.1. Hipótesis general

Hipótesis HG0:(Hipótesis General Nula)

H0: La aplicación de un modelo de programación lineal entera para la asignación óptima de operadores polifuncionales en una mina de cobre a tajo abierto no incrementará la producción de metros perforados ni mejorará la eficiencia de las operaciones mineras.

Hipótesis HGa:(Hipótesis General Alterna)

H1: La aplicación de un modelo de programación lineal entera para la asignación óptima de operadores polifuncionales en una mina de cobre a tajo abierto incrementará la producción de metros perforados y mejorará la eficiencia de las operaciones mineras.

Para realizar la validación del modelo de programación lineal entera. Se realiza pruebas estadísticas de prueba t de Student, lo cual los metros perforados estimados antes de utilizar el modelo y los metros perforados optimizados utilizando el modelo de programación lineal entera se detallan en la Tabla 12.

Tabla 12

Metros estimados y metros optimizados

MES	Metros Estimado sin aplicar el modelo	Metros Optimizados con el modelo
Mes 01	158,394	173,188
Mes 02	158,666	173,957
Mes 03	137,430	149,285
Mes 04	166,566	179,779
Mes 05	156,538	169,619
Mes 06	137,455	149,200
Mes 07	147,690	161,706
Mes 08	154,022	168,373
Mes 09	142,874	156,994
Mes 10	153,254	168,480
Mes 11	146,129	159,121
Mes 12	155,809	170,681

Fuente: Elaboración Propia

Aplicando la prueba de T-Student a los datos de la tabla 12 en el programa de Minitab se detalla en la Figura 13.

Figura 13

Resultados de la prueba de T de Student de los metros perforadoras estimado y optimizados

Método					Estimación de la diferencia								
μ_1 : media de población de Metros Estimado μ_2 : media de población de Metros Optimizados Diferencia: $\mu_1 - \mu_2$ <i>No se presupuso igualdad de varianzas para este análisis.</i>					IC de 95% para la diferencia <table border="1"> <tr> <th>Diferencia</th> <th colspan="2">IC de 95% para la diferencia</th> </tr> <tr> <td>-13796</td> <td colspan="2">(-21769; -5823)</td> </tr> </table>			Diferencia	IC de 95% para la diferencia		-13796	(-21769; -5823)	
Diferencia	IC de 95% para la diferencia												
-13796	(-21769; -5823)												
Estadísticas descriptivas					Prueba								
				Error estándar de la media	Hipótesis nula	$H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$							
					Hipótesis alterna	$H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$							
Muestra	N	Media	Desv.Est.	Error estándar de la media	Valor T	GL	Valor p						
Metros Estimado	12	151236	9002	2599	-3.60	21	0.002						
Metros Optimizados	12	165032	9765	2819									

Fuente: Elaboración Propia

Dado que el valor p es 0.002, el cual es menor que el nivel de significancia establecido (generalmente 0.05), se rechaza la hipótesis nula y se concluye que hay una diferencia significativa en la cantidad de metros perforados estimados y los metros optimizados utilizando el modelo de programación lineal entera. Y de acepta la Hipótesis General Alterna.

4.2.2. Hipótesis secundarias

Hipótesis HG0:(Hipótesis Secundaria Nula)

H0: Desarrollar un modelo de programación lineal entera que considere las habilidades y restricciones de los operadores polifuncionales y las características operativas de la mina no permitirá obtener una asignación de operadores que maximice la producción de metros perforados.

Hipótesis HG0:(Hipótesis Secundaria Alterna)

H1: Desarrollar un modelo de programación lineal entera que considere las habilidades y restricciones de los operadores polifuncionales y las características operativas de la mina permitirá obtener una asignación de operadores que maximice la producción de metros perforados.

Realizando el cálculo comparativo de los metros perforados estimados y los metros optimizados con el modelo se tienen los siguientes resultados según la Tabla 13.

Tabla 13

Incremento de metros perforados

MES	Metros Estimado sin aplicar el modelo	Metros Optimizados con el modelo	Incremento de Metros Perforados
Mes 01	158,394	173,188	14,793
Mes 02	158,666	173,957	15,291
Mes 03	137,430	149,285	11,855
Mes 04	166,566	179,779	13,213
Mes 05	156,538	169,619	13,081
Mes 06	137,455	149,200	11,745
Mes 07	147,690	161,706	14,016
Mes 08	154,022	168,373	14,350
Mes 09	142,874	156,994	14,121
Mes 10	153,254	168,480	15,226
Mes 11	146,129	159,121	12,991
Mes 12	155,809	170,681	14,872
TOTAL	1,814,828	1,980,382	165,554

Fuente: Elaboración Propia

De la Tabla 13 se observa el incremento de los metros perforados aplicando el modelo de optimización (1,980,382 metros) respecto a los metros estimados sin aplicar el modelo (1,814,828 metros) de 165,554 metros. Por lo cual se puede concluir puedes concluir que la hipótesis secundaria alterna H1 es válida.

Hipótesis HG0:(Hipótesis Secundaria Nula)

H0: El modelo de programación lineal entera para la asignación óptima de operadores polifuncionales en una mina de cobre a tajo abierto no es robusto frente a cambios en los parámetros clave y las condiciones operativas.

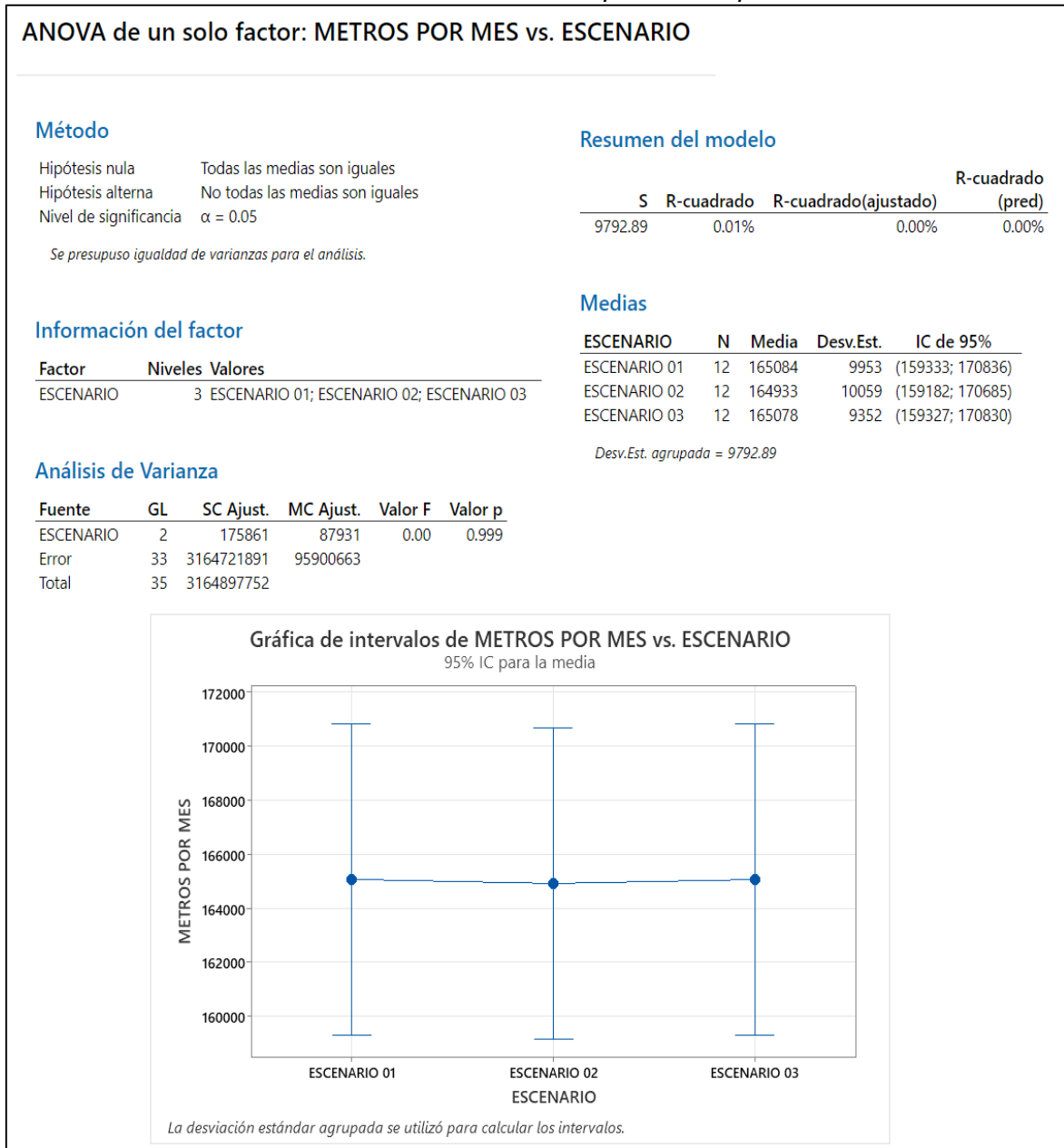
Hipótesis HG0:(Hipótesis Secundaria Alterna)

H1: El modelo de programación lineal entera para la asignación óptima de operadores polifuncionales en una mina de cobre a tajo abierto es robusto frente a cambios en los parámetros clave y las condiciones operativas, permitiendo mantener la optimización de los metros perforados de producción incluso en escenarios de variabilidad.

Para evaluar la hipótesis se aplicará el análisis de varianza (ANOVA) a los tres escenarios de los metros perforados por mes aplicando la distribución de ausentismo en la Tabla 11 en el software Minitab ver la Figura 14.

Figura 14

Resultados del Análisis de Varianza de los metros perforados por mes



Fuente: Elaboración Propia

Dado que el valor p es 0.999, el cual es mayor que el nivel de significancia establecido (generalmente 0.05), se concluye que no hay una diferencia significativa y que el modelo es robusto frente al ausentismo del personal.

4.3. Impacto económico del incremento de metros perforados

Para evaluar el impacto económico del incremento de metros perforados, se considera los gastos fijos de Labor (Planilla), Contractor (Servicios de Agua y Combustible), Power (Energía eléctrica y combustible), Otros, Mantenimiento. Asimismo, se considera como gasto variable en función a los metros perforados los Consumables (Aceros de Perforación).

Tabla 14

Variación del costo unitario de perforación US\$/metro

Descripción	Escenario Estimado			Escenario Optimizado			Variación US\$/mtr. (%)
	US\$	US\$/mtr.	Porcentaje	US\$	US\$/mtr.	Porcentaje	
Labor	2,783,144	1.53	9.8%	2,783,144	1.41	9.7%	-8.4%
Consumables	4,315,335	2.38	15.3%	4,708,994	2.38	16.4%	0.0%
Contractor	124,618	0.07	0.4%	124,618	0.06	0.4%	-8.4%
Power	4,975,175	2.74	17.6%	4,975,175	2.51	17.3%	-8.4%
Otros	279,180	0.15	1.0%	279,180	0.14	1.0%	-8.4%
Mantenimiento	15,814,300	8.71	55.9%	15,814,300	7.99	55.1%	-8.4%
Total	28,291,752	15.59	100.0%	28,685,411	14.48	100.0%	-7.1%

Fuente: Elaboración Propia

Nota. Para el Escenario estimado se ha considerado una velocidad de perforación de 33.10 m/hr y un metraje anual de 1,814,828 metros y para el escenario optimizado 36.17 m/hr y 1,980,382 metros.

Del análisis de la Tabla 14 se observó que con la aplicación del modelo de programación lineal entera una reducción del costo US\$/metro de 1.11 US\$/metro. Si aplicamos esta reducción de costo respecto a los metros estimados de 1,814,828 metros se obtiene un ahorro de US\$ 2,004,361.

Conclusiones

El desarrollo de un modelo de programación lineal entera en la asignación óptima de operadores polifuncionales en una mina de cobre a tajo abierto ha demostrado ser efectiva para incrementar la producción de metros perforados, lo cual permitiría incrementar en 9.12% los metros perforados (165,554 metros)

La recolección y análisis de información relevante sobre la mina, los operadores polifuncionales y las restricciones de ausentismo fueron fundamentales para desarrollar el modelo de programación lineal entera que considera la dureza de la roca, velocidad de perforación, profundidad, operadores, perforadoras, disponibilidad, uso de la disponibilidad, eficiencia operativa de la mina en estudio.

La resolución del modelo de programación lineal entera utilizando software de optimización, como Lingo o Lindo, permite obtener una solución óptima para la asignación de operadores polifuncionales, facilitando el proceso de toma de decisiones en la gestión de minas.

El análisis de sensibilidad llevado a cabo en esta investigación permitió identificar áreas de mejora en la asignación de recursos y posibles cambios de las condiciones por el ausentismo del personal que pueden afectar la solución óptima, proporcionando información valiosa para la gestión de minas.

Recomendaciones

Realizar actualizaciones periódicas del modelo de programación lineal entera, considerando cambios en las condiciones operativas, nuevas contrataciones de operadores polifuncionales o cambios en las habilidades de los operadores existentes.

Capacitar a los operadores polifuncionales en múltiples funciones y habilidades, lo que permitirá una mayor flexibilidad en la asignación de tareas y contribuirá a la optimización de los recursos humanos y materiales disponibles.

Implementar un sistema de seguimiento y evaluación del desempeño de los operadores polifuncionales, con el objetivo de identificar áreas de mejora y proporcionar retroalimentación para ajustar el modelo de programación lineal entera según sea necesario.

Considerar la posibilidad de ampliar el alcance del modelo de programación lineal entera a otras áreas de la operación minera, como el transporte y almacenamiento de material, para lograr una mayor eficiencia y rentabilidad en todo el proceso minero.

Fomentar la colaboración entre los profesionales de la industria minera y los investigadores en el campo de la optimización y programación lineal para seguir desarrollando y mejorando las herramientas y enfoques aplicados en la gestión de minas y la optimización de recursos.

Referencias bibliográficas

- Anderson, D., Martin, R., Camm, J. D., Sweeney, D. & Williams, T. (2004). *Métodos cuantitativos para Los negocios (11va ed.)*. Cengage Learning Editores S.A. de C.V.
- Bernal, C. (1979), *Aplicación de programación lineal en minería a cielo abierto* [Tesis Profesional, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio Institucional UNI. <https://repositorio.uni.edu.pe/handle/20.500.14076/12800>
- Cabrera, E. (2017). *Modelos de programación lineal. Guía para su formulación y solución*. Universidad de Lima, Fondo Editorial
- Cáceres, R. A. (2012), *Aplicación de alta precisión en la perforación de mallas de producción en Cía. Minera Yanacocha SRL* [Tesis Profesional, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio Institucional UNI. <https://repositorio.uni.edu.pe/handle/20.500.14076/1654>
- Canizo, E. & Lucero, P. (2002). *Investigación Operativa 2002 Software Para Programación Lineal*. LINGO/LINDO. Consultado el 30 de marzo de 2023.
- Caterpillar. (2013). *Manual de operación y mantenimiento (BI12546_ES)*. Estados Unidos Consultado el 30 de marzo de 2023.
- Cortijo, J. M. (1987), *Optimización del plan de producción y control de calidad del mineral utilizando un modelo de programación lineal* [Tesis Profesional, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio Institucional UNI. <https://repositorio.uni.edu.pe/handle/20.500.14076/12902>
- Cuenca, C. M. (2012), *Método para reducción de costos de perforación* [Tesis Profesional, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio Institucional UNI. <https://repositorio.uni.edu.pe/handle/20.500.14076/9874>
- Epiroc. (2019). *PV-351D RCS 4.19 Operación (Nro: 11129695755.1.11129713419 es-MX)*
- Ghose A. K. & Akhilesh J. (2012). *Blasting in mines - new trends*. CRC Press.
- Gokhale, B. V. (2018). *Rotary Drilling and Blasting in Large Surface Mines*. CRC Press.

- Gómez, J., Manglano, S., Toledo J., López, C. & López, E. (1995). *Manual de arranque, carga y transporte en minería a cielo abierto*, (2da Ed.) Instituto Geológico y Minero de España.
- González, A. (2010). *Manual práctico de investigación de operaciones I*. (3ra ed.) Universidad del Norte.
- Hamdy, A. (2012). *Investigación de operaciones*, (9na ed.) Pearson.
- Hillier, F. S. (2015). *Introducción a la Investigación de Operaciones*. (10ma ed.) McGraw-Hill Interamericana.
- Hinostroza, W. E. (2022). *Aplicación de la filosofía de la sección cero para determinar los límites finales de un PIT*. Tesis de titulación profesional de Ingeniero de Minas. Universidad Nacional de Ingeniería.
- Hustrulid, W. A., & Kuchta, M. (2006). *Open pit mine planning and design, two volume set, second edition (2a ed.)*. CRC Press.
- Hustrulid, W. A., Kuchta, M., & Martin, R. K. (2013). *Open pit mine planning and design, two volume set & CD-ROM pack, third edition (3a ed.)*. CRC Press.
- Hustrulid, W. A., Kuchta, M., & Martin, R. K. (2013b). *Open pit mine planning and design, two volume set & CD-ROM pack: V1: Fundamentals, V2: CSMine software package, CD-ROM: CS mine software (3a ed.)*. CRC Press.
<https://doi.org/10.1201/b15068>
- Ivorra, C. (s.f.). *Optimización con LINGO*. Consultado el 30 de marzo de 2023. Recuperado de: <https://www.uv.es/~ivorra/docencia/LINGOav.pdf>
- Jimeno, C. L., Bermúdez, P. G., & Jimeno, E. L. (2017). *Manual de perforación, explosivos y voladuras. Minería y obras públicas*. (1ra ed.) Universidad Politécnica De Madrid.
- Jimeno, C. L., Bermúdez, P. G., & Jimeno, E. L. (2019). *Manual de perforación, explosivos y voladuras. Minería y obras públicas*. (2ra ed.) Universidad Politécnica De Madrid.
- León, Y. I. (2002), *Optimización en problemas de asignación de recursos y tareas usando computación evolutiva y multiagentes inteligentes* [Tesis Profesional, Universidad

- Nacional de Ingeniería]. Repositorio Institucional UNI.
<https://repositorio.uni.edu.pe/handle/20.500.14076/10657>
- Lopez, F. (2006). *Investigación operativa Modelos determinísticos*. Ejercicios resueltos. Universidad del País Vasco.
- López, J. (2003). *Manual de Perforación y Voladura de Rocas*. Madrid, España: Instituto Tecnológico Geominero
- Matco. (s.f.). MD6640-2012. Recuperado de <https://www.matco.com.mx/producto-nuevo/mineria/perforadoras/nuevo/md6640-2012?tipo=perforadoras-giratorias>
- Mendoza, A (2012), *Reducción de costos mediante la optimización de parámetros de perforación y voladura caso: Minas pampa* [Informe de Suficiencia, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio Institucional UNI.
<https://repositorio.uni.edu.pe/handle/20.500.14076/10345>
- Ortíz, M. & Olivares, P. (2015). *Investigación de operaciones*. Lima, Peru: Empresa Editora Macro
- P&H Mining Equipment, Inc. (2013). *Manual del Operador 320XPC (32XC-D-O-MM-LA-0002)*. Estados Unidos
- Rodríguez, E. Z. (2006), *Asignación multicriterio de tareas a trabajadores polivalentes* [Tesis Doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya]. Repositorio Institucional UPC. <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/93259>
- Scott, A., & Kruttschnitt, J. (1996). *Open pit blast design: Analysis and optimisation*. Mineral Research Centre.
- Sierksma, G., & Zwols, Y. (2015). *Linear and integer optimization: Theory and practice*, third edition (3a ed.). Productivity Press.
- Túpac Yupanqui, D. D. (2012), *Homogenización de la ley de cabeza del mineral aplicando programación lineal* [Informe de Suficiencia, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio Institucional UNI.
<https://repositorio.uni.edu.pe/handle/20.500.14076/11082>

Vásquez, D. M. Merino (2015), *Mejora en el proceso de perforación y voladura - Unidad Cerro Verde* [Tesis Profesional, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio Institucional UNI. <https://repositorio.uni.edu.pe/handle/20.500.14076/9675>

Vásquez, J. A. (2008), *Elaboración de un método para optimizar la asignación de tripulación o itinerarios de vuelos para las aerolíneas* [Tesis Profesional, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio Institucional UNI. <https://repositorio.uni.edu.pe/handle/20.500.14076/466>

Anexos

Pág.

Anexo 1: Plan de disponibilidad uso de la disponibilidad y eficiencia operativa de perforadoras	2
Anexo 2: Plan de perforación según tipo de roca.....	4
Anexo 3: Velocidades de perforación por dureza de roca para los perforistas	6
Anexo 4: Metraje promedio para un día de 24 horas de trabajo de cada perforista y perforadora	14
Anexo 5: Código de programación de lingo para seleccionar los operadores de perforadora que maximiza el metraje diario	16
Anexo 6: Resultados del código de programación de lingo para seleccionar los operadores de perforadora que maximiza el metraje diario de 4 guardias	20
Anexo 7: Tablas de ausentismo para las 4 guardias con 0, 1, 2 y 3 ausentismos	22
Anexo 8: Metros perforados por día considerando el ausentismo	25

Anexo 1

Plan de disponibilidad uso de la disponibilidad y eficiencia operativa de perforadoras

Mes		Mes 01	Mes 02	Mes 03	Mes 04	Mes 05	Mes 06	Mes 07	Mes 08	Mes 09	Mes 10	Mes 11	Mes 12	Año
Días	d	30	31	30	31	31	30	31	30	31	31	29	31	366
Perforadora 01														
Availability	%	0.91	0.82	0.94	0.92	0.87	0.91	0.91	0.85	0.90	0.90	0.91	0.91	0.90
Use of Availability	%	0.79	0.79	0.69	0.79	0.79	0.69	0.79	0.79	0.69	0.75	0.76	0.75	0.76
Operating Efficiency (OE)	%	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93
Perforadora 01 Op. Hours	h	484	449	434	500	473	422	497	454	432	470	445	471	5,531
Perforadora 01 Op. Hours por día	h	16.1	14.5	14.5	16.1	15.3	14.1	16.0	15.1	13.9	15.1	15.4	15.2	15.1
Perforadora 02														
Availability	%	0.91	0.92	0.85	0.92	0.92	0.91		0.91	0.90	0.90	0.91	0.91	0.83
Use of Availability	%	0.79	0.79	0.69	0.79	0.79	0.69		0.79	0.69	0.75	0.76	0.75	0.75
Operating Efficiency (OE)	%	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93		0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93
Perforadora 02 Op. Hours	h	484	500	392	500	502	422		482	432	470	445	471	5,102
Perforadora 02 Op. Hours por día	h	16.1	16.1	13.1	16.1	16.2	14.1		16.1	13.9	15.1	15.4	15.2	13.9
Perforadora 03														
Availability	%	0.85	0.92	0.91	0.92	0.85	0.91	0.91	0.80	0.90	0.90	0.87	0.91	0.89
Use of Availability	%	0.79	0.79	0.69	0.79	0.79	0.69	0.79	0.79	0.69	0.75	0.76	0.78	0.76
Operating Efficiency (OE)	%	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93
Perforadora 03 Op. Hours	h	449	500	422	500	466	422	497	426	432	470	427	490	5,502
Perforadora 03 Op. Hours por día	h	15.0	16.1	14.1	16.1	15.0	14.1	16.0	14.2	13.9	15.1	14.7	15.8	15.0
Perforadora 04														
Availability	%	0.92	0.87	0.94	0.92	0.81	0.94	0.91	0.87	0.91	0.91	0.83	0.91	0.90
Use of Availability	%	0.79	0.79	0.69	0.79	0.79	0.69	0.79	0.79	0.69	0.75	0.76	0.75	0.76
Operating Efficiency (OE)	%	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93
Perforadora 04 Op. Hours	h	485	475	434	501	441	434	499	465	434	471	409	474	5,524
Perforadora 04 Op. Hours por día	h	16.2	15.3	14.5	16.2	14.2	14.5	16.1	15.5	14.0	15.2	14.1	15.3	15.1
Perforadora 05														
Availability	%	0.85	0.94	0.92	0.92	0.85	0.91	0.92	0.94	0.91	0.84	0.91	0.91	0.90
Use of Availability	%	0.79	0.79	0.69	0.79	0.79	0.69	0.79	0.79	0.69	0.75	0.76	0.75	0.76
Operating Efficiency (OE)	%	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93
Perforadora 05 Op. Hours	h	449	514	424	500	466	423	501	497	433	435	445	473	5,562
Perforadora 05 Op. Hours por día	h	15.0	16.6	14.1	16.1	15.0	14.1	16.2	16.6	14.0	14.0	15.4	15.3	15.2
Perforadora 06														
Availability	%	0.91	0.92	0.85	0.92	0.87	0.91	0.78	0.91	0.91	0.82	0.91	0.90	0.88
Use of Availability	%	0.79	0.79	0.69	0.79	0.79	0.69	0.79	0.79	0.69	0.75	0.76	0.75	0.76
Operating Efficiency (OE)	%	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93
Perforadora 06 Op. Hours	h	484	500	393	500	475	423	427	483	433	426	445	468	5,456
Perforadora 06 Op. Hours por día	h	16.1	16.1	13.1	16.1	15.3	14.1	13.8	16.1	14.0	13.7	15.4	15.1	14.9
Perforadora 07														
Availability	%	0.94	0.73	0.91	0.94	0.92	0.91	0.94	0.76	0.91	0.91	0.90	0.82	0.88
Use of Availability	%	0.78	0.78	0.69	0.78	0.79	0.69	0.79	0.79	0.69	0.75	0.76	0.75	0.75
Operating Efficiency (OE)	%	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93
Perforadora 07 Op. Hours	h	491	394	423	510	500	423	513	406	432	470	445	428	5,434
Perforadora 07 Op. Hours por día	h	16.4	12.7	14.1	16.5	16.1	14.1	16.5	13.5	13.9	15.2	15.3	13.8	14.8
Perforadora 08														
Availability	%	0.91	0.81	0.91	0.91	0.86	0.91	0.90	0.90	0.90	0.83	0.89	0.90	0.88
Use of Availability	%	0.80	0.80	0.69	0.80	0.80	0.69	0.81	0.81	0.69	0.79	0.80	0.80	0.77
Operating Efficiency (OE)	%	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93
Perforadora 08 Op. Hours	h	485	452	418	505	476	418	506	487	428	453	463	500	5,590
Perforadora 08 Op. Hours por día	h	16.2	14.6	13.9	16.3	15.3	13.9	16.3	16.2	13.8	14.6	16.0	16.1	15.3
Perforadora 09														
Availability	%	0.91	0.90	0.91	0.91	0.76	0.91	0.90	0.84	0.90	0.86	0.89	0.77	0.87
Use of Availability	%	0.80	0.80	0.69	0.80	0.80	0.69	0.81	0.81	0.69	0.79	0.80	0.80	0.77
Operating Efficiency (OE)	%	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93
Perforadora 09 Op. Hours	h	485	499	418	504	423	418	509	459	428	471	463	427	5,503
Perforadora 09 Op. Hours por día	h	16.2	16.1	13.9	16.3	13.6	13.9	16.4	15.3	13.8	15.2	16.0	13.8	15.0
Perforadora 10														
Availability	%	0.90	0.90	0.84	0.90	0.90	0.74	0.90	0.89	0.89	0.89	0.81	0.90	0.87
Use of Availability	%	0.80	0.80	0.69	0.80	0.80	0.69	0.82	0.81	0.69	0.79	0.80	0.80	0.78
Operating Efficiency (OE)	%	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93
Perforadora 10 Op. Hours	h	483	503	387	503	500	341	508	488	426	489	422	498	5,547
Perforadora 10 Op. Hours por día	h	16.1	16.2	12.9	16.2	16.1	11.4	16.4	16.3	13.7	15.8	14.5	16.1	15.2

Anexo 2

Plan de perforación según tipo de roca

Dureza	Descripción	Mes 01	Mes 02	Mes 03	Mes 04	Mes 05	Mes 06	Mes 07	Mes 08	Mes 09	Mes 10	Mes 11	Mes 12	Total general
Suave	Material a Volar en kt	4	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	37
Suave	Metros a Perforar	18	17	14	17	17	14	17	17	14	15	16	16	192
Suave	Numero de Taladros	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	11
Suave	Horas Requeridas	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5
Medio	Material a Volar en kt	2,577	2,516	1,994	2,433	2,448	2,022	2,443	2,316	1,926	2,073	2,116	2,139	27,004
Medio	Metros a Perforar	15,804	15,320	12,606	15,307	15,632	13,011	15,513	14,816	12,361	13,520	14,304	14,525	172,720
Medio	Numero de Taladros	923	895	736	894	913	760	906	865	722	790	836	848	10,089
Medio	Horas Requeridas	417	406	329	400	406	341	415	393	330	363	378	387	4,565
Duro	Material a Volar en kt	12,434	13,159	11,307	13,530	12,963	10,788	12,621	13,010	11,486	12,110	11,380	11,232	146,021
Duro	Metros a Perforar	108,555	116,675	104,161	125,258	119,696	100,822	117,882	124,218	111,680	119,313	112,255	110,501	1,371,014
Duro	Numero de Taladros	6,413	6,906	6,173	7,423	7,085	5,968	6,975	7,362	6,627	7,076	6,645	6,537	81,191
Duro	Horas Requeridas	3,308	3,565	3,191	3,844	3,673	3,143	3,704	3,891	3,520	3,853	3,593	3,561	42,843
Muy Duro	Material a Volar en kt	1,896	1,851	1,467	1,790	1,801	1,488	1,797	1,704	1,417	1,525	1,557	1,574	19,865
Muy Duro	Metros a Perforar	17,824	17,326	14,080	17,129	17,418	14,520	17,466	16,622	13,897	15,203	15,951	16,248	193,685
Muy Duro	Numero de Taladros	1,041	1,012	822	1,001	1,017	848	1,020	971	812	888	932	949	11,313
Muy Duro	Horas Requeridas	762	731	630	760	788	666	789	755	633	705	751	766	8,737
Total Material a Volar en kt		16,910	17,529	14,771	17,755	17,216	14,301	16,865	17,033	14,831	15,711	15,056	14,948	192,927
Total Metros a Perforar		142,201	149,338	130,862	157,711	152,763	128,367	150,879	155,672	137,952	148,051	142,526	141,290	1,737,612
Total Numero de Taladros		8,379	8,814	7,733	9,318	9,016	7,577	8,902	9,200	8,161	8,755	8,413	8,335	102,604
Total Horas Requeridas		4,488	4,702	4,150	5,004	4,868	4,151	4,908	5,039	4,483	4,922	4,722	4,714	56,151

Anexo 3

Velocidades de perforación por dureza de roca para los perforistas

Operador	Perforadora	Modelo	Suave	Medio	Duro	Muy Duro	Vel.Prom.
Operador 01	Perforadora 01	P&H 320XPC	-	34.61	32.26	27.55	31.96
Operador 01	Perforadora 02	P&H 320XPC	-	29.25	30.10	27.16	29.69
Operador 01	Perforadora 03	P&H 320XPC	-	34.61	38.60	29.09	37.14
Operador 01	Perforadora 04	CAT M6640	-	35.44	25.36	-	25.36
Operador 01	Perforadora 05	CAT M6640	-	35.44	25.82	-	25.82
Operador 01	Perforadora 06	CAT M6640	-	35.44	25.82	-	25.82
Operador 01	Perforadora 07	CAT M6640	-	38.05	25.82	-	25.82
Operador 01	Perforadora 08	PV 351D	66.02	49.24	38.01	25.26	37.70
Operador 01	Perforadora 09	PV 351D	71.83	59.09	37.44	25.28	38.23
Operador 01	Perforadora 10	PV 351D	66.02	50.41	35.11	23.09	35.29
Operador 02	Perforadora 01	P&H 320XPC	37.57	38.81	37.60	28.75	36.73
Operador 02	Perforadora 02	P&H 320XPC	37.57	38.82	37.73	29.36	36.90
Operador 02	Perforadora 03	P&H 320XPC	37.57	38.81	33.17	24.29	32.74
Operador 02	Perforadora 04	CAT M6640	63.37	32.10	25.40	-	25.40
Operador 02	Perforadora 05	CAT M6640	63.37	43.23	23.06	-	23.06
Operador 02	Perforadora 06	CAT M6640	63.37	33.09	22.91	-	22.91
Operador 02	Perforadora 07	CAT M6640	63.37	35.76	23.52	-	23.52
Operador 03	Perforadora 08	PV 351D	-	46.02	34.81	24.49	34.77
Operador 03	Perforadora 09	PV 351D	-	52.41	34.83	25.09	35.49
Operador 03	Perforadora 10	PV 351D	-	43.71	34.00	23.77	33.82
Operador 04	Perforadora 04	CAT M6640	45.80	36.22	25.79	21.22	26.31
Operador 04	Perforadora 05	CAT M6640	46.34	37.77	27.56	22.15	27.97
Operador 04	Perforadora 06	CAT M6640	46.34	34.56	23.22	21.22	24.12
Operador 04	Perforadora 07	CAT M6640	46.34	35.29	23.58	21.22	24.48
Operador 04	Perforadora 08	PV 351D	74.47	53.48	39.82	25.64	39.60
Operador 04	Perforadora 09	PV 351D	74.47	53.69	39.37	26.44	39.35
Operador 04	Perforadora 10	PV 351D	69.09	51.93	39.75	23.78	39.17
Operador 05	Perforadora 01	P&H 320XPC	38.80	47.26	36.48	26.33	36.42
Operador 05	Perforadora 02	P&H 320XPC	38.24	43.94	37.90	28.87	37.49
Operador 05	Perforadora 03	P&H 320XPC	37.76	42.50	38.40	29.50	37.81
Operador 06	Perforadora 04	CAT M6640	39.51	35.90	27.95	29.83	28.95
Operador 06	Perforadora 05	CAT M6640	45.31	32.79	25.17	30.53	26.52
Operador 06	Perforadora 06	CAT M6640	54.41	35.27	24.42	30.53	26.18
Operador 06	Perforadora 07	CAT M6640	45.31	39.09	27.21	30.53	28.76
Operador 07	Perforadora 01	P&H 320XPC	38.34	45.53	43.76	32.31	42.66
Operador 07	Perforadora 02	P&H 320XPC	37.98	39.95	37.05	29.28	36.47
Operador 07	Perforadora 03	P&H 320XPC	37.98	41.27	39.09	31.92	38.50
Operador 07	Perforadora 04	CAT M6640	31.41	31.71	21.80	-	21.80
Operador 07	Perforadora 05	CAT M6640	31.41	30.94	22.01	-	22.01
Operador 07	Perforadora 06	CAT M6640	31.41	30.94	22.01	-	22.01
Operador 07	Perforadora 07	CAT M6640	31.02	30.73	22.01	-	22.01
Operador 08	Perforadora 08	PV 351D	-	42.29	31.74	22.72	31.78
Operador 08	Perforadora 09	PV 351D	-	59.12	34.59	26.12	36.08
Operador 08	Perforadora 10	PV 351D	-	38.90	30.24	25.07	30.52
Operador 09	Perforadora 01	P&H 320XPC	-	43.70	31.26	23.71	31.65
Operador 09	Perforadora 02	P&H 320XPC	-	41.12	32.07	27.22	32.43
Operador 09	Perforadora 03	P&H 320XPC	-	41.12	31.77	23.12	31.73
Operador 09	Perforadora 08	PV 351D	56.46	53.09	39.78	26.60	39.63
Operador 09	Perforadora 09	PV 351D	56.46	49.88	38.14	26.00	37.95
Operador 09	Perforadora 10	PV 351D	56.46	49.94	36.34	23.22	36.23
Operador 10	Perforadora 01	P&H 320XPC	-	45.85	39.93	31.72	39.60
Operador 10	Perforadora 02	P&H 320XPC	-	45.85	40.18	27.90	39.37
Operador 10	Perforadora 03	P&H 320XPC	-	44.51	39.82	33.05	39.53
Operador 10	Perforadora 04	CAT M6640	46.31	38.18	28.93	-	28.93
Operador 10	Perforadora 05	CAT M6640	47.02	42.93	24.49	-	24.49
Operador 10	Perforadora 06	CAT M6640	46.31	33.38	25.52	-	25.52
Operador 10	Perforadora 07	CAT M6640	46.31	33.19	27.35	-	27.35
Operador 10	Perforadora 08	PV 351D	-	48.91	39.97	25.88	39.28
Operador 10	Perforadora 09	PV 351D	-	52.54	38.40	28.43	38.69
Operador 10	Perforadora 10	PV 351D	-	49.25	39.44	27.32	39.06
Operador 11	Perforadora 01	P&H 320XPC	35.83	36.05	34.97	25.77	34.05
Operador 11	Perforadora 02	P&H 320XPC	35.83	30.92	32.92	25.06	31.84
Operador 11	Perforadora 03	P&H 320XPC	38.25	38.93	36.21	26.20	35.36
Operador 11	Perforadora 08	PV 351D	-	-	27.79	-	27.79
Operador 11	Perforadora 09	PV 351D	-	-	27.79	-	27.79
Operador 11	Perforadora 10	PV 351D	-	-	27.79	-	27.79

Operador	Perforadora	Modelo	Suave	Medio	Duro	Muy Duro	Vel.Prom.
Operador 12	Perforadora 02	P&H 320XPC	44.96	-	40.65	29.74	40.65
Operador 12	Perforadora 03	P&H 320XPC	44.96	-	36.55	26.29	36.55
Operador 12	Perforadora 04	CAT M6640	35.45	39.86	27.96	23.65	28.66
Operador 12	Perforadora 05	CAT M6640	44.44	35.79	26.38	22.96	26.93
Operador 12	Perforadora 06	CAT M6640	44.44	38.16	26.65	23.65	27.45
Operador 12	Perforadora 07	CAT M6640	44.44	43.61	26.65	23.65	28.00
Operador 12	Perforadora 08	PV 351D	64.81	53.98	41.63	28.62	41.40
Operador 12	Perforadora 09	PV 351D	69.66	58.03	46.30	28.80	45.51
Operador 12	Perforadora 10	PV 351D	69.66	52.73	40.28	28.80	40.23
Operador 13	Perforadora 01	P&H 320XPC	-	-	36.01	27.66	36.01
Operador 13	Perforadora 02	P&H 320XPC	-	-	36.01	27.66	36.01
Operador 13	Perforadora 03	P&H 320XPC	-	-	36.37	27.65	36.37
Operador 13	Perforadora 04	CAT M6640	-	-	24.45	-	24.45
Operador 13	Perforadora 05	CAT M6640	-	-	24.45	-	24.45
Operador 13	Perforadora 06	CAT M6640	-	-	23.72	-	23.72
Operador 13	Perforadora 07	CAT M6640	-	-	24.45	-	24.45
Operador 13	Perforadora 08	PV 351D	58.97	41.75	35.13	23.24	34.46
Operador 13	Perforadora 09	PV 351D	58.97	53.65	37.63	26.35	37.96
Operador 13	Perforadora 10	PV 351D	60.05	47.24	34.75	22.30	34.60
Operador 14	Perforadora 01	P&H 320XPC	-	44.16	34.14	26.97	34.33
Operador 14	Perforadora 02	P&H 320XPC	-	44.16	33.96	27.01	34.19
Operador 14	Perforadora 03	P&H 320XPC	-	44.16	37.07	26.77	36.62
Operador 15	Perforadora 01	P&H 320XPC	-	-	39.62	27.47	39.62
Operador 15	Perforadora 02	P&H 320XPC	-	-	39.06	25.80	39.06
Operador 15	Perforadora 03	P&H 320XPC	-	-	37.73	22.61	37.73
Operador 15	Perforadora 04	CAT M6640	50.05	39.80	28.64	17.84	28.54
Operador 15	Perforadora 05	CAT M6640	44.53	39.45	29.14	17.56	28.87
Operador 15	Perforadora 06	CAT M6640	41.71	39.26	28.34	17.56	28.22
Operador 15	Perforadora 07	CAT M6640	44.53	38.03	23.92	17.56	24.61
Operador 16	Perforadora 08	PV 351D	-	48.33	32.37	26.57	33.31
Operador 16	Perforadora 09	PV 351D	-	48.33	32.37	26.57	33.31
Operador 16	Perforadora 10	PV 351D	-	49.25	30.90	26.57	32.24
Operador 17	Perforadora 01	P&H 320XPC	-	-	38.32	26.22	38.32
Operador 17	Perforadora 02	P&H 320XPC	-	-	38.32	26.22	38.32
Operador 17	Perforadora 03	P&H 320XPC	-	-	38.32	26.22	38.32
Operador 17	Perforadora 04	CAT M6640	56.35	34.07	25.56	17.60	25.52
Operador 17	Perforadora 05	CAT M6640	56.44	39.02	25.34	16.78	25.74
Operador 17	Perforadora 06	CAT M6640	56.35	38.76	25.40	17.60	25.85
Operador 17	Perforadora 07	CAT M6640	56.35	38.76	25.40	17.60	25.85
Operador 17	Perforadora 08	PV 351D	74.12	50.25	34.63	21.69	34.74
Operador 17	Perforadora 09	PV 351D	70.58	49.67	35.75	24.00	35.82
Operador 17	Perforadora 10	PV 351D	70.58	41.24	31.92	23.27	31.88
Operador 18	Perforadora 01	P&H 320XPC	-	52.48	39.82	28.80	39.85
Operador 18	Perforadora 02	P&H 320XPC	-	52.48	39.82	28.80	39.85
Operador 18	Perforadora 03	P&H 320XPC	-	52.48	39.82	28.99	39.87
Operador 18	Perforadora 04	CAT M6640	39.80	30.95	23.47	16.59	23.44
Operador 18	Perforadora 05	CAT M6640	39.80	37.44	26.02	16.80	26.13
Operador 18	Perforadora 06	CAT M6640	39.80	37.21	25.73	16.70	25.86
Operador 18	Perforadora 07	CAT M6640	39.80	37.21	25.73	16.70	25.86
Operador 18	Perforadora 08	PV 351D	-	45.61	32.82	25.05	33.22
Operador 18	Perforadora 09	PV 351D	-	45.61	32.81	25.01	33.21
Operador 18	Perforadora 10	PV 351D	-	45.61	32.84	25.05	33.23
Operador 19	Perforadora 01	P&H 320XPC	-	-	37.85	-	37.85
Operador 19	Perforadora 02	P&H 320XPC	-	-	37.85	-	37.85
Operador 19	Perforadora 03	P&H 320XPC	-	-	37.85	-	37.85
Operador 20	Perforadora 01	P&H 320XPC	32.85	41.42	37.83	27.49	37.03
Operador 20	Perforadora 02	P&H 320XPC	35.19	38.58	33.39	26.53	33.14
Operador 20	Perforadora 03	P&H 320XPC	33.80	40.54	36.12	27.16	35.55
Operador 20	Perforadora 04	CAT M6640	-	31.87	21.85	-	21.85
Operador 20	Perforadora 05	CAT M6640	-	34.23	23.66	-	23.66
Operador 20	Perforadora 06	CAT M6640	-	32.55	22.66	-	22.66
Operador 20	Perforadora 07	CAT M6640	-	32.55	22.66	-	22.66
Operador 21	Perforadora 01	P&H 320XPC	-	-	37.55	26.27	37.55
Operador 21	Perforadora 02	P&H 320XPC	-	-	37.55	28.21	37.55
Operador 21	Perforadora 03	P&H 320XPC	-	-	37.55	30.65	37.55
Operador 21	Perforadora 04	CAT M6640	37.69	37.51	22.58	-	22.58
Operador 21	Perforadora 05	CAT M6640	37.69	36.22	29.29	-	29.29
Operador 21	Perforadora 06	CAT M6640	35.75	39.41	28.03	-	28.03
Operador 21	Perforadora 07	CAT M6640	37.69	33.13	24.50	-	24.50

Operador	Perforadora	Modelo	Suave	Medio	Duro	Muy Duro	Vel.Prom.
Operador 22	Perforadora 02	P&H 320XPC	-	43.06	36.91	31.26	36.89
Operador 22	Perforadora 03	P&H 320XPC	-	43.06	36.91	31.26	36.89
Operador 22	Perforadora 04	CAT M6640	46.90	34.72	24.24	-	24.24
Operador 22	Perforadora 05	CAT M6640	46.94	35.36	26.23	-	26.23
Operador 22	Perforadora 06	CAT M6640	46.90	30.19	22.07	-	22.07
Operador 22	Perforadora 07	CAT M6640	46.90	34.52	24.53	-	24.53
Operador 22	Perforadora 08	PV 351D	-	42.24	32.33	22.59	32.22
Operador 22	Perforadora 09	PV 351D	-	42.24	32.33	22.59	32.22
Operador 22	Perforadora 10	PV 351D	-	42.24	32.33	22.59	32.22
Operador 23	Perforadora 08	PV 351D	-	55.70	40.36	26.91	40.38
Operador 23	Perforadora 09	PV 351D	-	52.70	39.71	28.55	39.76
Operador 23	Perforadora 10	PV 351D	-	51.92	39.51	18.26	38.37
Operador 24	Perforadora 01	P&H 320XPC	-	43.12	40.80	37.47	40.66
Operador 24	Perforadora 02	P&H 320XPC	-	43.12	40.80	37.47	40.66
Operador 24	Perforadora 03	P&H 320XPC	-	43.12	40.80	37.47	40.66
Operador 24	Perforadora 04	CAT M6640	35.04	39.49	33.50	24.76	33.12
Operador 24	Perforadora 05	CAT M6640	35.04	32.53	28.49	24.76	28.47
Operador 24	Perforadora 06	CAT M6640	35.04	37.33	29.93	24.76	30.08
Operador 24	Perforadora 07	CAT M6640	33.41	38.07	28.68	24.76	29.17
Operador 25	Perforadora 01	P&H 320XPC	-	36.14	36.63	25.97	35.39
Operador 25	Perforadora 02	P&H 320XPC	-	36.14	39.65	27.99	38.00
Operador 25	Perforadora 03	P&H 320XPC	-	35.48	33.05	26.11	32.52
Operador 25	Perforadora 04	CAT M6640	-	30.45	25.41	-	25.41
Operador 25	Perforadora 05	CAT M6640	-	34.16	25.86	-	25.86
Operador 25	Perforadora 06	CAT M6640	-	36.37	25.41	-	25.41
Operador 25	Perforadora 07	CAT M6640	-	36.64	23.93	-	23.93
Operador 25	Perforadora 08	PV 351D	-	48.49	38.86	25.66	38.34
Operador 25	Perforadora 09	PV 351D	-	42.90	35.04	27.47	34.98
Operador 25	Perforadora 10	PV 351D	-	44.89	36.71	26.68	36.40
Operador 26	Perforadora 01	P&H 320XPC	52.68	45.32	41.01	31.76	40.40
Operador 26	Perforadora 02	P&H 320XPC	52.68	45.32	41.01	31.76	40.40
Operador 26	Perforadora 03	P&H 320XPC	52.68	45.32	41.01	31.76	40.40
Operador 26	Perforadora 04	CAT M6640	79.24	44.83	36.42	-	36.42
Operador 26	Perforadora 05	CAT M6640	69.04	45.20	37.15	-	37.15
Operador 26	Perforadora 06	CAT M6640	69.04	42.23	33.37	-	33.37
Operador 26	Perforadora 07	CAT M6640	69.04	43.94	35.66	-	35.66
Operador 26	Perforadora 08	PV 351D	-	54.95	46.13	-	46.13
Operador 26	Perforadora 09	PV 351D	-	54.95	46.13	-	46.13
Operador 26	Perforadora 10	PV 351D	-	54.95	46.13	-	46.13
Operador 27	Perforadora 08	PV 351D	-	41.80	28.30	-	28.30
Operador 27	Perforadora 09	PV 351D	-	41.80	28.30	-	28.30
Operador 27	Perforadora 10	PV 351D	-	41.80	28.30	-	28.30
Operador 28	Perforadora 01	P&H 320XPC	39.12	38.60	39.17	32.62	38.38
Operador 28	Perforadora 02	P&H 320XPC	42.80	40.46	39.75	30.36	38.77
Operador 28	Perforadora 03	P&H 320XPC	39.12	39.49	39.44	28.11	38.18
Operador 28	Perforadora 04	CAT M6640	-	39.53	29.48	23.94	29.86
Operador 28	Perforadora 05	CAT M6640	-	41.07	31.87	23.94	31.89
Operador 28	Perforadora 06	CAT M6640	-	39.99	30.69	23.94	30.86
Operador 28	Perforadora 07	CAT M6640	-	39.99	30.69	23.94	30.86
Operador 28	Perforadora 08	PV 351D	70.30	52.40	40.89	27.17	40.50
Operador 28	Perforadora 09	PV 351D	70.30	53.61	33.77	26.33	34.91
Operador 28	Perforadora 10	PV 351D	71.96	53.76	38.60	26.28	38.73
Operador 29	Perforadora 08	PV 351D	-	53.19	38.05	-	38.05
Operador 29	Perforadora 09	PV 351D	-	53.19	38.05	-	38.05
Operador 29	Perforadora 10	PV 351D	-	53.19	35.77	-	35.77
Operador 30	Perforadora 01	P&H 320XPC	45.14	43.89	37.47	20.57	36.22
Operador 30	Perforadora 02	P&H 320XPC	45.14	43.89	37.95	30.50	37.70
Operador 30	Perforadora 03	P&H 320XPC	45.14	43.89	37.45	29.17	37.17
Operador 30	Perforadora 04	CAT M6640	35.11	29.61	27.23	20.76	26.75
Operador 30	Perforadora 05	CAT M6640	35.11	29.81	27.03	20.76	26.60
Operador 30	Perforadora 06	CAT M6640	35.11	29.81	27.03	20.76	26.60
Operador 30	Perforadora 07	CAT M6640	35.11	28.64	23.94	20.76	24.05
Operador 30	Perforadora 08	PV 351D	-	46.93	29.90	-	29.90
Operador 30	Perforadora 09	PV 351D	-	46.93	29.90	-	29.90
Operador 30	Perforadora 10	PV 351D	-	44.41	29.30	-	29.30
Operador 31	Perforadora 01	P&H 320XPC	49.79	43.28	35.29	26.95	35.15
Operador 31	Perforadora 02	P&H 320XPC	49.79	43.28	34.72	25.03	34.48
Operador 31	Perforadora 03	P&H 320XPC	49.79	43.35	35.34	26.78	35.18
Operador 31	Perforadora 04	CAT M6640	-	29.82	23.21	18.96	23.39

Operador	Perforadora	Modelo	Suave	Medio	Duro	Muy Duro	Vel.Prom.
Operador 31	Perforadora 06	CAT M6640	-	33.41	23.15	18.96	23.70
Operador 31	Perforadora 07	CAT M6640	-	27.44	23.51	18.96	23.39
Operador 31	Perforadora 08	PV 351D	-	-	36.05	-	36.05
Operador 31	Perforadora 09	PV 351D	-	-	36.05	-	36.05
Operador 31	Perforadora 10	PV 351D	-	-	37.46	-	37.46
Operador 32	Perforadora 04	CAT M6640	-	35.41	29.62	-	29.62
Operador 32	Perforadora 05	CAT M6640	-	35.41	29.62	-	29.62
Operador 32	Perforadora 06	CAT M6640	-	35.41	29.62	-	29.62
Operador 32	Perforadora 07	CAT M6640	-	35.68	30.07	-	30.07
Operador 32	Perforadora 08	PV 351D	70.12	60.82	46.58	32.73	46.45
Operador 32	Perforadora 09	PV 351D	70.47	61.73	45.29	31.01	45.33
Operador 32	Perforadora 10	PV 351D	70.12	53.87	42.31	31.10	42.21
Operador 33	Perforadora 01	P&H 320XPC	-	37.90	33.08	27.55	32.94
Operador 33	Perforadora 02	P&H 320XPC	-	37.90	37.60	31.52	36.95
Operador 33	Perforadora 03	P&H 320XPC	-	37.90	35.83	29.17	35.29
Operador 33	Perforadora 04	CAT M6640	47.62	34.60	25.03	18.44	25.24
Operador 33	Perforadora 05	CAT M6640	47.62	36.79	27.19	18.31	27.15
Operador 33	Perforadora 06	CAT M6640	47.62	35.53	26.96	18.31	26.85
Operador 33	Perforadora 07	CAT M6640	47.62	31.80	25.92	18.31	25.65
Operador 34	Perforadora 01	P&H 320XPC	-	46.20	41.84	32.58	41.24
Operador 34	Perforadora 02	P&H 320XPC	-	35.06	41.19	31.64	39.51
Operador 34	Perforadora 03	P&H 320XPC	-	43.73	37.18	30.17	37.05
Operador 34	Perforadora 04	CAT M6640	57.49	42.79	27.02	-	27.02
Operador 34	Perforadora 05	CAT M6640	57.49	43.07	27.83	-	27.83
Operador 34	Perforadora 06	CAT M6640	57.49	34.64	26.66	-	26.66
Operador 34	Perforadora 07	CAT M6640	57.49	30.57	22.45	-	22.45
Operador 34	Perforadora 08	PV 351D	-	46.66	37.61	-	37.61
Operador 34	Perforadora 09	PV 351D	-	46.66	37.61	-	37.61
Operador 34	Perforadora 10	PV 351D	-	46.62	36.97	-	36.97
Operador 35	Perforadora 01	P&H 320XPC	-	50.33	42.84	29.44	42.08
Operador 35	Perforadora 02	P&H 320XPC	-	33.16	36.43	30.01	35.38
Operador 35	Perforadora 03	P&H 320XPC	-	57.29	36.78	31.09	38.18
Operador 35	Perforadora 04	CAT M6640	56.84	37.62	27.04	-	27.04
Operador 35	Perforadora 05	CAT M6640	46.83	34.44	28.02	-	28.02
Operador 35	Perforadora 06	CAT M6640	46.84	35.48	26.48	-	26.48
Operador 35	Perforadora 07	CAT M6640	46.84	35.80	27.33	-	27.33
Operador 36	Perforadora 01	P&H 320XPC	-	36.84	37.11	27.79	36.04
Operador 36	Perforadora 02	P&H 320XPC	-	36.84	37.11	23.47	35.56
Operador 36	Perforadora 03	P&H 320XPC	-	36.76	36.93	28.16	35.93
Operador 36	Perforadora 04	CAT M6640	57.87	38.18	27.94	21.10	28.19
Operador 36	Perforadora 05	CAT M6640	58.48	40.55	25.31	20.70	26.31
Operador 36	Perforadora 06	CAT M6640	58.48	31.47	22.60	21.40	23.34
Operador 36	Perforadora 07	CAT M6640	58.48	35.24	24.68	21.40	25.36
Operador 37	Perforadora 01	P&H 320XPC	-	-	37.20	21.13	37.20
Operador 37	Perforadora 02	P&H 320XPC	-	-	37.20	21.13	37.20
Operador 37	Perforadora 03	P&H 320XPC	-	-	37.20	21.13	37.20
Operador 37	Perforadora 04	CAT M6640	-	32.49	24.35	-	24.35
Operador 37	Perforadora 05	CAT M6640	-	32.49	24.35	-	24.35
Operador 37	Perforadora 06	CAT M6640	-	33.08	24.35	-	24.35
Operador 37	Perforadora 07	CAT M6640	-	32.49	24.35	-	24.35
Operador 37	Perforadora 08	PV 351D	72.50	52.77	39.45	17.81	38.35
Operador 37	Perforadora 09	PV 351D	72.50	50.00	44.25	30.99	43.34
Operador 37	Perforadora 10	PV 351D	72.50	52.81	39.35	23.80	38.95
Operador 38	Perforadora 01	P&H 320XPC	-	-	35.98	30.26	35.98
Operador 38	Perforadora 02	P&H 320XPC	-	-	36.86	30.26	36.86
Operador 38	Perforadora 03	P&H 320XPC	-	-	35.01	30.39	35.01
Operador 38	Perforadora 04	CAT M6640	50.89	36.42	25.79	22.85	26.51
Operador 38	Perforadora 05	CAT M6640	52.09	37.95	26.86	24.00	27.64
Operador 38	Perforadora 06	CAT M6640	50.89	37.10	25.97	22.85	26.73
Operador 38	Perforadora 07	CAT M6640	50.89	35.64	21.93	22.85	23.39
Operador 38	Perforadora 08	PV 351D	-	47.19	42.86	23.59	41.14
Operador 38	Perforadora 09	PV 351D	-	47.13	35.72	24.32	35.58
Operador 38	Perforadora 10	PV 351D	-	42.78	31.06	22.10	31.22
Operador 39	Perforadora 01	P&H 320XPC	-	-	39.41	30.13	39.41
Operador 39	Perforadora 02	P&H 320XPC	-	-	39.06	30.13	39.06
Operador 39	Perforadora 03	P&H 320XPC	-	-	39.06	30.13	39.06
Operador 39	Perforadora 04	CAT M6640	-	34.84	24.10	-	24.10
Operador 39	Perforadora 05	CAT M6640	-	38.15	28.95	-	28.95
Operador 39	Perforadora 06	CAT M6640	-	47.99	24.50	-	24.50

Operador	Perforadora	Modelo	Suave	Medio	Duro	Muy Duro	Vel.Prom.
Operador 40	Perforadora 01	P&H 320XPC	52.69	50.44	38.45	29.57	38.65
Operador 40	Perforadora 02	P&H 320XPC	52.69	50.44	37.74	28.32	37.95
Operador 40	Perforadora 03	P&H 320XPC	52.69	50.44	37.74	29.08	38.03
Operador 40	Perforadora 04	CAT M6640	-	34.22	24.92	-	24.92
Operador 40	Perforadora 05	CAT M6640	-	34.22	24.92	-	24.92
Operador 40	Perforadora 06	CAT M6640	-	34.22	24.92	-	24.92
Operador 40	Perforadora 07	CAT M6640	-	34.22	24.73	-	24.73
Operador 40	Perforadora 08	PV 351D	-	55.96	40.65	27.15	40.67
Operador 40	Perforadora 09	PV 351D	-	55.28	41.44	27.15	41.21
Operador 40	Perforadora 10	PV 351D	-	55.28	40.65	27.15	40.60
Operador 41	Perforadora 01	P&H 320XPC	32.40	35.07	31.11	24.05	30.71
Operador 41	Perforadora 02	P&H 320XPC	32.40	35.02	30.97	24.03	30.60
Operador 41	Perforadora 03	P&H 320XPC	32.40	35.07	31.11	24.05	30.71
Operador 41	Perforadora 04	CAT M6640	45.58	35.20	30.66	-	30.66
Operador 41	Perforadora 05	CAT M6640	45.58	36.12	30.63	-	30.63
Operador 41	Perforadora 06	CAT M6640	45.58	35.20	30.66	-	30.66
Operador 41	Perforadora 07	CAT M6640	45.58	35.20	30.66	-	30.66
Operador 42	Perforadora 08	PV 351D	-	53.13	37.82	27.84	38.22
Operador 42	Perforadora 09	PV 351D	-	53.33	36.86	27.07	37.40
Operador 42	Perforadora 10	PV 351D	-	50.24	40.49	27.50	40.00
Operador 43	Perforadora 04	CAT M6640	39.52	35.89	28.64	21.49	28.56
Operador 43	Perforadora 05	CAT M6640	39.52	35.89	28.64	21.49	28.56
Operador 43	Perforadora 06	CAT M6640	38.20	34.98	28.19	21.49	28.11
Operador 43	Perforadora 07	CAT M6640	39.52	39.78	32.76	21.49	32.20
Operador 43	Perforadora 08	PV 351D	-	-	38.98	-	38.98
Operador 43	Perforadora 09	PV 351D	-	-	38.98	-	38.98
Operador 43	Perforadora 10	PV 351D	-	-	38.98	-	38.98
Operador 44	Perforadora 01	P&H 320XPC	61.31	49.12	37.98	30.82	38.29
Operador 44	Perforadora 02	P&H 320XPC	61.31	36.01	37.20	29.11	36.18
Operador 44	Perforadora 03	P&H 320XPC	64.07	52.80	39.00	33.23	39.72
Operador 44	Perforadora 04	CAT M6640	40.42	37.78	28.46	-	28.46
Operador 44	Perforadora 05	CAT M6640	40.62	38.29	26.75	-	26.75
Operador 44	Perforadora 06	CAT M6640	40.62	37.15	25.67	-	25.67
Operador 44	Perforadora 07	CAT M6640	40.62	37.73	27.27	-	27.27
Operador 44	Perforadora 08	PV 351D	-	46.27	36.39	25.69	36.18
Operador 44	Perforadora 09	PV 351D	-	48.55	37.27	25.95	37.13
Operador 44	Perforadora 10	PV 351D	-	45.68	36.33	25.72	36.08
Operador 45	Perforadora 01	P&H 320XPC	40.53	40.13	38.70	30.68	37.94
Operador 45	Perforadora 02	P&H 320XPC	40.80	39.03	34.82	28.32	34.51
Operador 45	Perforadora 03	P&H 320XPC	40.80	39.94	38.42	33.52	38.02
Operador 45	Perforadora 04	CAT M6640	45.06	34.62	29.56	-	29.56
Operador 45	Perforadora 05	CAT M6640	45.98	37.01	24.88	-	24.88
Operador 45	Perforadora 06	CAT M6640	45.06	32.47	25.85	-	25.85
Operador 45	Perforadora 07	CAT M6640	45.06	31.27	25.39	-	25.39
Operador 45	Perforadora 08	PV 351D	-	48.38	38.26	22.65	37.52
Operador 45	Perforadora 09	PV 351D	-	48.66	36.10	22.03	35.78
Operador 45	Perforadora 10	PV 351D	-	47.41	38.26	22.03	37.36
Operador 46	Perforadora 01	P&H 320XPC	-	45.26	36.63	27.26	36.44
Operador 46	Perforadora 02	P&H 320XPC	-	40.67	38.39	31.66	37.86
Operador 46	Perforadora 03	P&H 320XPC	-	38.63	37.33	27.70	36.38
Operador 46	Perforadora 04	CAT M6640	-	36.52	27.31	-	27.31
Operador 46	Perforadora 05	CAT M6640	-	33.28	26.90	-	26.90
Operador 46	Perforadora 06	CAT M6640	-	38.31	27.37	-	27.37
Operador 46	Perforadora 07	CAT M6640	-	31.10	27.26	-	27.26
Operador 46	Perforadora 08	PV 351D	-	56.08	41.39	29.49	41.52
Operador 46	Perforadora 09	PV 351D	-	46.09	37.93	28.90	37.73
Operador 46	Perforadora 10	PV 351D	-	46.89	37.57	28.90	37.52
Operador 47	Perforadora 04	CAT M6640	47.94	39.43	28.52	23.90	29.09
Operador 47	Perforadora 05	CAT M6640	48.61	43.95	33.53	25.98	33.72
Operador 47	Perforadora 06	CAT M6640	47.94	43.54	33.41	25.81	33.57
Operador 47	Perforadora 07	CAT M6640	47.94	32.76	33.41	25.81	32.50
Operador 47	Perforadora 08	PV 351D	-	48.83	38.64	-	38.64
Operador 47	Perforadora 09	PV 351D	-	47.08	40.13	-	40.13
Operador 47	Perforadora 10	PV 351D	-	47.08	42.54	-	42.54
Operador 48	Perforadora 01	P&H 320XPC	-	33.63	31.05	23.46	30.46
Operador 48	Perforadora 02	P&H 320XPC	-	34.58	31.42	23.38	30.83
Operador 48	Perforadora 03	P&H 320XPC	-	34.58	31.42	26.23	31.15
Operador 48	Perforadora 04	CAT M6640	51.25	36.19	29.92	-	29.92
Operador 48	Perforadora 05	CAT M6640	50.96	38.57	29.86	-	29.86

Operador	Perforadora	Modelo	Suave	Medio	Duro	Muy Duro	Vel.Prom.
Operador 48	Perforadora 07	CAT M6640	51.25	36.88	29.41	-	29.41
Operador 48	Perforadora 08	PV 351D	-	45.01	34.74	24.51	34.62
Operador 48	Perforadora 09	PV 351D	-	44.97	34.47	24.14	34.35
Operador 48	Perforadora 10	PV 351D	-	45.06	32.80	22.35	32.85
Operador 49	Perforadora 04	CAT M6640	59.52	41.18	27.18	22.54	28.05
Operador 49	Perforadora 05	CAT M6640	59.52	37.22	27.18	22.54	27.66
Operador 49	Perforadora 06	CAT M6640	59.52	37.23	27.18	22.54	27.66
Operador 49	Perforadora 07	CAT M6640	59.52	37.23	27.18	22.54	27.66
Operador 50	Perforadora 08	PV 351D	-	40.57	29.01	-	29.01
Operador 50	Perforadora 09	PV 351D	-	40.57	32.62	-	32.62
Operador 50	Perforadora 10	PV 351D	-	40.93	34.93	-	34.93
Operador 51	Perforadora 01	P&H 320XPC	45.42	43.03	39.60	31.72	39.05
Operador 51	Perforadora 02	P&H 320XPC	45.42	43.03	32.56	29.22	33.22
Operador 51	Perforadora 03	P&H 320XPC	45.42	43.00	39.92	31.84	39.32
Operador 51	Perforadora 04	CAT M6640	-	33.11	27.43	-	27.43
Operador 51	Perforadora 05	CAT M6640	-	34.12	31.06	-	31.06
Operador 51	Perforadora 06	CAT M6640	-	35.54	31.32	-	31.32
Operador 51	Perforadora 07	CAT M6640	-	33.08	29.49	-	29.49
Operador 52	Perforadora 01	P&H 320XPC	31.87	34.38	36.25	28.74	35.23
Operador 52	Perforadora 02	P&H 320XPC	31.87	34.17	35.75	28.51	34.79
Operador 52	Perforadora 03	P&H 320XPC	31.87	34.17	33.61	28.55	33.10
Operador 52	Perforadora 04	CAT M6640	-	33.92	28.56	-	28.56
Operador 52	Perforadora 05	CAT M6640	-	35.92	28.47	-	28.47
Operador 52	Perforadora 06	CAT M6640	-	33.92	28.56	-	28.56
Operador 52	Perforadora 07	CAT M6640	-	33.92	28.56	-	28.56
Operador 53	Perforadora 01	P&H 320XPC	45.33	42.40	35.60	26.39	35.25
Operador 53	Perforadora 02	P&H 320XPC	46.31	45.58	36.03	28.84	36.18
Operador 53	Perforadora 03	P&H 320XPC	46.31	45.58	41.79	33.24	41.21
Operador 53	Perforadora 04	CAT M6640	51.15	40.48	29.75	-	29.75
Operador 53	Perforadora 05	CAT M6640	51.15	44.35	28.75	-	28.75
Operador 53	Perforadora 06	CAT M6640	51.15	40.48	29.09	-	29.09
Operador 53	Perforadora 07	CAT M6640	51.15	38.91	30.43	-	30.43
Operador 53	Perforadora 08	PV 351D	74.27	53.32	39.40	24.86	39.16
Operador 53	Perforadora 09	PV 351D	74.27	49.88	38.35	26.20	38.14
Operador 53	Perforadora 10	PV 351D	74.27	52.27	34.31	23.26	34.86
Operador 54	Perforadora 01	P&H 320XPC	-	-	34.35	27.43	34.35
Operador 54	Perforadora 02	P&H 320XPC	-	-	34.35	27.43	34.35
Operador 54	Perforadora 03	P&H 320XPC	-	-	34.89	27.75	34.89
Operador 54	Perforadora 04	CAT M6640	-	34.49	27.27	-	27.27
Operador 54	Perforadora 05	CAT M6640	-	33.84	27.85	-	27.85
Operador 54	Perforadora 06	CAT M6640	-	33.26	27.27	-	27.27
Operador 54	Perforadora 07	CAT M6640	-	32.71	24.99	-	24.99
Operador 54	Perforadora 08	PV 351D	-	45.48	40.56	24.63	39.27
Operador 54	Perforadora 09	PV 351D	-	61.05	39.96	25.18	40.41
Operador 54	Perforadora 10	PV 351D	-	48.94	35.82	24.63	35.87
Operador 55	Perforadora 01	P&H 320XPC	-	-	42.00	32.43	42.00
Operador 55	Perforadora 02	P&H 320XPC	-	-	37.11	32.43	37.11
Operador 55	Perforadora 03	P&H 320XPC	-	-	49.17	32.43	49.17
Operador 55	Perforadora 04	CAT M6640	46.25	37.87	28.88	22.10	29.02
Operador 55	Perforadora 05	CAT M6640	46.25	36.94	30.29	22.10	30.04
Operador 55	Perforadora 06	CAT M6640	46.25	36.33	26.39	22.10	26.90
Operador 55	Perforadora 07	CAT M6640	46.25	39.04	28.85	22.10	29.11
Operador 55	Perforadora 08	PV 351D	-	48.98	40.18	27.73	39.66
Operador 55	Perforadora 09	PV 351D	-	48.98	41.11	27.73	40.39
Operador 55	Perforadora 10	PV 351D	-	48.72	38.59	26.18	38.21
Operador 56	Perforadora 01	P&H 320XPC	38.44	41.04	38.97	31.21	38.31
Operador 56	Perforadora 02	P&H 320XPC	38.44	41.04	38.97	31.21	38.31
Operador 56	Perforadora 03	P&H 320XPC	38.44	41.04	38.97	31.21	38.31
Operador 56	Perforadora 04	CAT M6640	-	31.19	22.40	-	22.40
Operador 56	Perforadora 05	CAT M6640	-	31.66	22.40	-	22.40
Operador 56	Perforadora 06	CAT M6640	-	31.66	22.40	-	22.40
Operador 56	Perforadora 07	CAT M6640	-	31.66	22.40	-	22.40
Operador 57	Perforadora 01	P&H 320XPC	46.42	46.06	35.14	26.59	35.27
Operador 57	Perforadora 02	P&H 320XPC	45.41	46.04	36.24	32.74	36.82
Operador 57	Perforadora 03	P&H 320XPC	45.41	46.04	35.24	26.71	35.36
Operador 57	Perforadora 04	CAT M6640	43.52	34.01	25.91	-	25.91
Operador 57	Perforadora 05	CAT M6640	46.61	42.32	24.28	-	24.28
Operador 57	Perforadora 06	CAT M6640	46.61	28.65	25.18	-	25.18
Operador 57	Perforadora 07	CAT M6640	46.61	37.01	25.81	-	25.81

Operador	Perforadora	Modelo	Suave	Medio	Duro	Muy Duro	Vel.Prom.
Operador 58	Perforadora 09	PV 351D	-	45.83	37.79	27.07	37.39
Operador 58	Perforadora 10	PV 351D	-	46.89	37.09	27.12	36.95
Operador 59	Perforadora 08	PV 351D	-	43.29	32.29	24.08	32.46
Operador 59	Perforadora 09	PV 351D	-	44.31	33.00	24.24	33.15
Operador 59	Perforadora 10	PV 351D	-	43.29	28.92	24.08	29.80
Operador 60	Perforadora 01	P&H 320XPC	-	-	31.82	26.38	31.82
Operador 60	Perforadora 02	P&H 320XPC	-	-	37.05	31.71	37.05
Operador 60	Perforadora 03	P&H 320XPC	-	-	39.65	27.54	39.65
Operador 60	Perforadora 08	PV 351D	54.24	50.98	36.88	24.58	36.90
Operador 60	Perforadora 09	PV 351D	54.24	47.20	33.57	26.73	34.16
Operador 60	Perforadora 10	PV 351D	54.24	51.64	37.62	24.71	37.57
Operador 61	Perforadora 08	PV 351D	-	-	35.25	-	35.25
Operador 61	Perforadora 09	PV 351D	-	-	35.15	-	35.15
Operador 61	Perforadora 10	PV 351D	-	-	35.25	-	35.25
Operador 62	Perforadora 01	P&H 320XPC	27.17	43.39	37.12	26.16	36.52
Operador 62	Perforadora 02	P&H 320XPC	32.14	38.08	34.69	27.23	34.20
Operador 62	Perforadora 03	P&H 320XPC	26.86	32.77	36.99	27.92	35.55
Operador 62	Perforadora 04	CAT M6640	34.61	33.49	24.66	-	24.66
Operador 62	Perforadora 05	CAT M6640	34.61	31.62	23.32	-	23.32
Operador 62	Perforadora 06	CAT M6640	34.62	32.23	24.09	-	24.09
Operador 62	Perforadora 07	CAT M6640	34.61	25.90	24.09	-	24.09
Operador 63	Perforadora 01	P&H 320XPC	-	44.51	39.91	31.78	39.46
Operador 63	Perforadora 02	P&H 320XPC	-	44.51	39.91	31.78	39.46
Operador 63	Perforadora 03	P&H 320XPC	-	48.15	41.83	32.55	41.42
Operador 63	Perforadora 04	CAT M6640	43.32	43.47	27.52	-	27.52
Operador 63	Perforadora 05	CAT M6640	40.92	36.31	25.11	-	25.11
Operador 63	Perforadora 06	CAT M6640	37.30	32.79	25.68	-	25.68
Operador 63	Perforadora 07	CAT M6640	40.92	30.71	24.00	-	24.00
Operador 63	Perforadora 08	PV 351D	64.58	49.74	28.88	26.45	30.68
Operador 63	Perforadora 09	PV 351D	64.58	49.74	32.99	26.45	33.92
Operador 63	Perforadora 10	PV 351D	64.58	49.81	37.28	26.71	37.35

Anexo 4

Metraje promedio para un día de 24 horas de trabajo de cada perforista y perforadora

Operadores	PERFORADORA									
	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10
Operador 01	483	414	558	383	392	385	383	576	575	535
Operador 02	555	514	492	383	350	342	349	0	0	0
Operador 03	0	0	0	0	0	0	0	531	534	513
Operador 04	0	0	0	397	425	360	363	605	592	594
Operador 05	550	523	568	0	0	0	0	0	0	0
Operador 06	0	0	0	437	403	390	427	0	0	0
Operador 07	645	508	579	329	335	328	327	0	0	0
Operador 08	0	0	0	0	0	0	0	485	542	463
Operador 09	478	452	477	0	0	0	0	605	571	549
Operador 10	598	549	594	437	372	380	406	600	582	592
Operador 11	515	444	532	0	0	0	0	425	418	421
Operador 12	624	567	549	432	409	409	416	632	684	610
Operador 13	544	502	547	369	372	354	363	526	571	524
Operador 14	519	477	550	0	0	0	0	0	0	0
Operador 15	599	544	567	431	439	421	365	0	0	0
Operador 16	0	0	0	0	0	0	0	509	501	489
Operador 17	579	534	576	385	391	385	384	531	539	483
Operador 18	602	555	599	354	397	386	384	507	499	504
Operador 19	572	528	569	0	0	0	0	0	0	0
Operador 20	560	462	534	330	360	338	336	0	0	0
Operador 21	568	523	564	341	445	418	364	0	0	0
Operador 22	557	514	554	366	399	329	364	492	485	488
Operador 23	0	0	0	0	0	0	0	617	598	581
Operador 24	614	567	611	500	433	448	433	0	0	0
Operador 25	535	530	489	383	393	379	355	586	526	552
Operador 26	611	563	607	550	565	498	529	705	694	699
Operador 27	0	0	0	0	0	0	0	432	426	429
Operador 28	580	540	574	451	485	460	458	619	525	587
Operador 29	0	0	0	0	0	0	0	581	572	542
Operador 30	547	526	559	404	404	397	357	457	450	444
Operador 31	531	481	529	353	399	353	347	551	542	568
Operador 32	0	0	0	447	450	442	446	709	682	640
Operador 33	498	515	530	381	413	400	381	0	0	0
Operador 34	623	551	557	408	423	398	333	574	565	560
Operador 35	636	493	574	408	426	395	406	0	0	0
Operador 36	545	496	540	425	400	348	377	0	0	0
Operador 37	562	519	559	368	370	363	362	586	652	590
Operador 38	544	514	526	400	420	398	347	628	535	473
Operador 39	596	545	587	364	440	365	358	0	0	0
Operador 40	584	529	572	376	379	371	367	621	620	615
Operador 41	464	427	462	463	466	457	455	0	0	0
Operador 42	0	0	0	0	0	0	0	584	562	606
Operador 43	0	0	0	431	434	419	478	595	586	591
Operador 44	579	504	597	430	407	383	405	553	558	547
Operador 45	573	481	572	446	378	385	377	573	538	566
Operador 46	551	528	547	412	409	408	405	634	567	569
Operador 47	0	0	0	439	512	500	482	590	603	645
Operador 48	460	430	468	452	454	438	437	529	517	498
Operador 49	0	0	0	423	420	412	411	0	0	0
Operador 50	0	0	0	0	0	0	0	443	490	529
Operador 51	590	463	591	414	472	467	438	0	0	0
Operador 52	532	485	497	431	433	426	424	0	0	0
Operador 53	533	504	619	449	437	434	452	598	573	528
Operador 54	519	479	524	412	423	407	371	600	608	544
Operador 55	635	517	739	438	456	401	432	606	607	579
Operador 56	579	534	576	338	340	334	333	0	0	0
Operador 57	533	513	532	391	369	375	383	0	0	0
Operador 58	0	0	0	0	0	0	0	541	562	560
Operador 59	0	0	0	0	0	0	0	496	498	452
Operador 60	481	517	596	0	0	0	0	564	514	569
Operador 61	0	0	0	0	0	0	0	538	528	534
Operador 62	552	477	534	372	354	359	358	0	0	0
Operador 63	596	550	623	415	382	383	356	469	510	566

Anexo 5

**Código de programación de lingo para seleccionar los operadores de perforadora
que maximiza el metraje diario**

!Los comentarios son inicias con el signo “!” y son de color verde y resto del texto corresponde al lenguaje de programación del Lingo

SETS:

!Primero se declaran las variables

Perforista/1..63;
Perforadora/1..10;
Guardia/1..4/;

!Segundo se declaran las parejas y terna que van ha ser utilizadas para realizar las sumatorias

!La Pareja1 representa a todos los elementos de las sumatorias de los perforistas y las perforadoras.

Pareja1(Perforista, Perforadora): Metros;

!La Pareja2 representa a todos los elementos de las sumatorias de los perforistas y las guardias.

Pareja2(Perforista, Guardia);

!La Pareja1 representa a todos los elementos de las sumatorias de los perforadoras y las guardias.

Pareja3(Perforadora, Guardia);

ENDSETS

!Tercero se detallan los metros que puede realizar cada operador por perforadora cada fila representa un operador y cada columna las perforadoras

DATA:

Metros =

483	414	558	383	392	385	383	576	575	535
555	514	492	383	350	342	349	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	531	534	513
0	0	0	397	425	360	363	605	592	594
550	523	568	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	437	403	390	427	0	0	0
645	508	579	329	335	328	327	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	485	542	463
478	452	477	0	0	0	0	605	571	549
598	549	594	437	372	380	406	600	582	592
515	444	532	0	0	0	0	425	418	421
624	567	549	432	409	409	416	632	684	610
544	502	547	369	372	354	363	526	571	524
519	477	550	0	0	0	0	0	0	0
599	544	567	431	439	421	365	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	509	501	489
579	534	576	385	391	385	384	531	539	483
602	555	599	354	397	386	384	507	499	504
572	528	569	0	0	0	0	0	0	0

560	462	534	330	360	338	336	0	0	0
568	523	564	341	445	418	364	0	0	0
557	514	554	366	399	329	364	492	485	488
0	0	0	0	0	0	0	617	598	581
614	567	611	500	433	448	433	0	0	0
535	530	489	383	393	379	355	586	526	552
611	563	607	550	565	498	529	705	694	699
0	0	0	0	0	0	0	432	426	429
580	540	574	451	485	460	458	619	525	587
0	0	0	0	0	0	0	581	572	542
547	526	559	404	404	397	357	457	450	444
531	481	529	353	399	353	347	551	542	568
0	0	0	447	450	442	446	709	682	640
498	515	530	381	413	400	381	0	0	0
623	551	557	408	423	398	333	574	565	560
636	493	574	408	426	395	406	0	0	0
545	496	540	425	400	348	377	0	0	0
562	519	559	368	370	363	362	586	652	590
544	514	526	400	420	398	347	628	535	473
596	545	587	364	440	365	358	0	0	0
584	529	572	376	379	371	367	621	620	615
464	427	462	463	466	457	455	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	584	562	606
0	0	0	431	434	419	478	595	586	591
579	504	597	430	407	383	405	553	558	547
573	481	572	446	378	385	377	573	538	566
551	528	547	412	409	408	405	634	567	569
0	0	0	439	512	500	482	590	603	645
460	430	468	452	454	438	437	529	517	498
0	0	0	423	420	412	411	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	443	490	529
590	463	591	414	472	467	438	0	0	0
532	485	497	431	433	426	424	0	0	0
533	504	619	449	437	434	452	598	573	528
519	479	524	412	423	407	371	600	608	544
635	517	739	438	456	401	432	606	607	579
579	534	576	338	340	334	333	0	0	0
533	513	532	391	369	375	383	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	541	562	560
0	0	0	0	0	0	0	496	498	452
481	517	596	0	0	0	0	564	514	569
0	0	0	0	0	0	0	538	528	534
552	477	534	372	354	359	358	0	0	0
596	550	623	415	382	383	356	469	510	566

;

ENDDATA

!Función Objetivo: Consiste en maximizar el Metraje Total, para lo cual se realiza la sumatoria de Metros(i, j) por la variable de decisión X(i, j, k) que se encuentran en la terna(i, j, k).

[MetrajeTotal] Max = @SUM(Terna(i, j, k): Metros(i, j)* X(i,j,k));

!Restricciones:

!La variable de decisión solo puede tomar valores de 0 ó 1. Para lo cual, se crea un FOR para generar una restricción para cada elemento de la Terna(i,j,k) , asimismo, cada restricción consiste en que la variable de decisión solo puede tomar valores de 0 ó 1 (@BIN(X(i,j,k))).

@FOR (Terna(i,j,k): @BIN(X(i,j,k)));

!El número máximo de operadores seleccionados debe ser m*p (número de perforadoras por número de guardias). Para lo cual, se crea una restricción que consiste en la sumatoria de todos los X(i, j, k) que se encuentran en la Terna (Perforista, Perforadora, Guardia) que tienen que ser menor o igual al número de perforadoras por número de guardias (@size(Pareja3)).

@SUM(Terna(i,j,k): X(i,j,k)) <= @size(Pareja3);

!Por cada guardia el número máximo de operadores debe ser m (número de perforadoras). Para lo cual, se crea un FOR para generar una restricción para cada guardia (k= 1,...,p), asimismo, cada restricción consiste en la sumatoria de todos los X(i, j, k) que se encuentran en la Pareja1 (Perforista, Perforadora) que tienen que ser menor o igual al número de perforadoras (@size(Perforadora)).

@FOR(Guardia(k): [PorGuardia] @SUM(Pareja1(i,j): X(i,j,k))<= @size(Perforadora));

!El número máximo de operadores por perforadora debe ser p (número de guardias). Para lo cual, se crea un FOR para generar una restricción para perforadora (i= 1,...,m), asimismo, cada restricción consiste en la sumatoria de todos los X(i, j, k) que se encuentran en la Pareja2 (Perforista, Guardia) que tienen que ser menor o igual al número de guardias (@size(Guardia)).

@FOR(Perforadora(j):[PorPerforadora]@SUM(Pareja2(i,k): X(i,j,k))<= @size(Guardia));

Anexo 6

Resultados del código de programación de lingo para seleccionar los operadores de perforadora que maximiza el metraje diario de 4 guardias

Global optimal solution found.
Objective value: 22112.00
Objective bound: 22112.00
Infeasibilities: 0.000000
Extended solver steps: 813
Total solver iterations: 10824
Elapsed runtime seconds: 0.50

Model Class: PILP

Total variables: 2520
Nonlinear variables: 0
Integer variables: 2520

Total constraints: 93
Nonlinear constraints: 0

Total nonzeros: 16912
Nonlinear nonzeros: 0

Anexo 7

Tablas de ausentismo para las 4 guardias con 0, 1, 2 y 3 ausentismos

Guardia	Mes	Ausentismo 01	Metros por día Sin Ausentismo	Mes	Ausentismo 01	Metros por día con 1 Ausentismo	Mes	Ausentismo 01	Ausentismo 02	Metros por día con 2 Ausentismo	Mes	Ausentismo 01	Ausentismo 02	Ausentismo 03	Metros por día con 3 Ausentismo
1	Mes 01	Ningun Titular	5,883	Mes 01	Titular 01	5,852	Mes 01	Titular 01	Titular 02	5,756	Mes 01	Titular 01	Titular 02	Titular 03	5,737
1	Mes 02	Ningun Titular	5,723	Mes 02	Titular 02	5,637	Mes 02	Titular 02	Titular 03	5,620	Mes 02	Titular 02	Titular 03	Titular 04	5,452
1	Mes 03	Ningun Titular	5,109	Mes 03	Titular 03	5,095	Mes 03	Titular 03	Titular 04	4,953	Mes 03	Titular 03	Titular 04	Titular 05	4,878
1	Mes 04	Ningun Titular	5,989	Mes 04	Titular 04	5,827	Mes 04	Titular 04	Titular 05	5,740	Mes 04	Titular 04	Titular 05	Titular 06	5,665
1	Mes 05	Ningun Titular	5,623	Mes 05	Titular 05	5,550	Mes 05	Titular 05	Titular 06	5,498	Mes 05	Titular 05	Titular 06	Titular 07	5,432
1	Mes 06	Ningun Titular	5,095	Mes 06	Titular 06	5,039	Mes 06	Titular 06	Titular 07	4,974	Mes 06	Titular 06	Titular 07	Titular 08	4,933
1	Mes 07	Ningun Titular	5,314	Mes 07	Titular 07	5,262	Mes 07	Titular 07	Titular 08	5,218	Mes 07	Titular 07	Titular 08	Titular 09	5,173
1	Mes 08	Ningun Titular	5,735	Mes 08	Titular 08	5,689	Mes 08	Titular 08	Titular 09	5,652	Mes 08	Titular 08	Titular 09	Titular 10	5,606
1	Mes 09	Ningun Titular	5,138	Mes 09	Titular 09	5,114	Mes 09	Titular 09	Titular 10	5,068	Mes 09	Titular 09	Titular 10	Titular 01	5,027
1	Mes 10	Ningun Titular	5,523	Mes 10	Titular 10	5,473	Mes 10	Titular 10	Titular 01	5,447	Mes 10	Titular 10	Titular 01	Titular 02	5,357
1	Mes 11	Ningun Titular	5,629	Mes 11	Titular 02	5,538	Mes 11	Titular 02	Titular 03	5,522	Mes 11	Titular 02	Titular 03	Titular 04	5,366
1	Mes 12	Ningun Titular	5,616	Mes 12	Titular 03	5,600	Mes 12	Titular 03	Titular 04	5,447	Mes 12	Titular 03	Titular 04	Titular 05	5,373
2	Mes 01	Ningun Titular	5,878	Mes 01	Titular 01	5,842	Mes 01	Titular 01	Titular 02	5,807	Mes 01	Titular 01	Titular 02	Titular 03	5,762
2	Mes 02	Ningun Titular	5,723	Mes 02	Titular 02	5,689	Mes 02	Titular 02	Titular 03	5,648	Mes 02	Titular 02	Titular 03	Titular 04	5,608
2	Mes 03	Ningun Titular	5,106	Mes 03	Titular 03	5,075	Mes 03	Titular 03	Titular 04	5,042	Mes 03	Titular 03	Titular 04	Titular 05	4,858
2	Mes 04	Ningun Titular	5,989	Mes 04	Titular 04	5,950	Mes 04	Titular 04	Titular 05	5,734	Mes 04	Titular 04	Titular 05	Titular 06	5,707
2	Mes 05	Ningun Titular	5,631	Mes 05	Titular 05	5,506	Mes 05	Titular 05	Titular 06	5,478	Mes 05	Titular 05	Titular 06	Titular 07	5,421
2	Mes 06	Ningun Titular	5,096	Mes 06	Titular 06	5,072	Mes 06	Titular 06	Titular 07	5,033	Mes 06	Titular 06	Titular 07	Titular 08	4,942
2	Mes 07	Ningun Titular	5,297	Mes 07	Titular 07	5,287	Mes 07	Titular 07	Titular 08	5,194	Mes 07	Titular 07	Titular 08	Titular 09	5,135
2	Mes 08	Ningun Titular	5,723	Mes 08	Titular 08	5,649	Mes 08	Titular 08	Titular 09	5,601	Mes 08	Titular 08	Titular 09	Titular 10	5,435
2	Mes 09	Ningun Titular	5,132	Mes 09	Titular 09	5,109	Mes 09	Titular 09	Titular 10	4,945	Mes 09	Titular 09	Titular 10	Titular 01	4,915
2	Mes 10	Ningun Titular	5,529	Mes 10	Titular 10	5,357	Mes 10	Titular 10	Titular 01	5,322	Mes 10	Titular 10	Titular 01	Titular 02	5,283
2	Mes 11	Ningun Titular	5,625	Mes 11	Titular 02	5,593	Mes 11	Titular 02	Titular 03	5,549	Mes 11	Titular 02	Titular 03	Titular 04	5,511
2	Mes 12	Ningun Titular	5,629	Mes 12	Titular 03	5,593	Mes 12	Titular 03	Titular 04	5,560	Mes 12	Titular 03	Titular 04	Titular 05	5,356

Guardia	Mes	Ausentismo 01	Metros por día Sin Ausentismo	Mes	Ausentismo 01	Metros por día con 1 Ausentismo	Mes	Ausentismo 01	Ausentismo 02	Metros por día con 2 Ausentismo	Mes	Ausentismo 01	Ausentismo 02	Ausentismo 03	Metros por día con 3 Ausentismo
3	Mes 01	Ningun Titular	5,869	Mes 01	Titular 01	5,829	Mes 01	Titular 01	Titular 02	5,726	Mes 01	Titular 01	Titular 02	Titular 03	5,652
3	Mes 02	Ningun Titular	5,687	Mes 02	Titular 02	5,589	Mes 02	Titular 02	Titular 03	5,528	Mes 02	Titular 02	Titular 03	Titular 04	5,483
3	Mes 03	Ningun Titular	5,087	Mes 03	Titular 03	5,027	Mes 03	Titular 03	Titular 04	4,984	Mes 03	Titular 03	Titular 04	Titular 05	4,944
3	Mes 04	Ningun Titular	5,968	Mes 04	Titular 04	5,917	Mes 04	Titular 04	Titular 05	5,866	Mes 04	Titular 04	Titular 05	Titular 06	5,755
3	Mes 05	Ningun Titular	5,608	Mes 05	Titular 05	5,558	Mes 05	Titular 05	Titular 06	5,450	Mes 05	Titular 05	Titular 06	Titular 07	5,413
3	Mes 06	Ningun Titular	5,077	Mes 06	Titular 06	4,981	Mes 06	Titular 06	Titular 07	4,946	Mes 06	Titular 06	Titular 07	Titular 08	4,861
3	Mes 07	Ningun Titular	5,281	Mes 07	Titular 07	5,259	Mes 07	Titular 07	Titular 08	5,194	Mes 07	Titular 07	Titular 08	Titular 09	5,155
3	Mes 08	Ningun Titular	5,701	Mes 08	Titular 08	5,625	Mes 08	Titular 08	Titular 09	5,589	Mes 08	Titular 08	Titular 09	Titular 10	5,582
3	Mes 09	Ningun Titular	5,118	Mes 09	Titular 09	5,087	Mes 09	Titular 09	Titular 10	5,081	Mes 09	Titular 09	Titular 10	Titular 01	5,044
3	Mes 10	Ningun Titular	5,508	Mes 10	Titular 10	5,501	Mes 10	Titular 10	Titular 01	5,463	Mes 10	Titular 10	Titular 01	Titular 02	5,361
3	Mes 11	Ningun Titular	5,602	Mes 11	Titular 02	5,512	Mes 11	Titular 02	Titular 03	5,447	Mes 11	Titular 02	Titular 03	Titular 04	5,397
3	Mes 12	Ningun Titular	5,594	Mes 12	Titular 03	5,530	Mes 12	Titular 03	Titular 04	5,480	Mes 12	Titular 03	Titular 04	Titular 05	5,429
4	Mes 01	Ningun Titular	5,902	Mes 01	Titular 01	5,871	Mes 01	Titular 01	Titular 02	5,810	Mes 01	Titular 01	Titular 02	Titular 03	5,653
4	Mes 02	Ningun Titular	5,738	Mes 02	Titular 02	5,677	Mes 02	Titular 02	Titular 03	5,559	Mes 02	Titular 02	Titular 03	Titular 04	5,536
4	Mes 03	Ningun Titular	5,118	Mes 03	Titular 03	5,017	Mes 03	Titular 03	Titular 04	4,998	Mes 03	Titular 03	Titular 04	Titular 05	4,902
4	Mes 04	Ningun Titular	6,007	Mes 04	Titular 04	5,984	Mes 04	Titular 04	Titular 05	5,888	Mes 04	Titular 04	Titular 05	Titular 06	5,800
4	Mes 05	Ningun Titular	5,638	Mes 05	Titular 05	5,552	Mes 05	Titular 05	Titular 06	5,480	Mes 05	Titular 05	Titular 06	Titular 07	5,409
4	Mes 06	Ningun Titular	5,114	Mes 06	Titular 06	5,052	Mes 06	Titular 06	Titular 07	5,000	Mes 06	Titular 06	Titular 07	Titular 08	4,891
4	Mes 07	Ningun Titular	5,316	Mes 07	Titular 07	5,256	Mes 07	Titular 07	Titular 08	5,144	Mes 07	Titular 07	Titular 08	Titular 09	5,061
4	Mes 08	Ningun Titular	5,743	Mes 08	Titular 08	5,618	Mes 08	Titular 08	Titular 09	5,542	Mes 08	Titular 08	Titular 09	Titular 10	5,473
4	Mes 09	Ningun Titular	5,152	Mes 09	Titular 09	5,088	Mes 09	Titular 09	Titular 10	5,025	Mes 09	Titular 09	Titular 10	Titular 01	4,984
4	Mes 10	Ningun Titular	5,540	Mes 10	Titular 10	5,475	Mes 10	Titular 10	Titular 01	5,442	Mes 10	Titular 10	Titular 01	Titular 02	5,382
4	Mes 11	Ningun Titular	5,646	Mes 11	Titular 02	5,591	Mes 11	Titular 02	Titular 03	5,474	Mes 11	Titular 02	Titular 03	Titular 04	5,452
4	Mes 12	Ningun Titular	5,623	Mes 12	Titular 03	5,523	Mes 12	Titular 03	Titular 04	5,501	Mes 12	Titular 03	Titular 04	Titular 05	5,391

Anexo 8

Metros perforados por día considerando el ausentismo

Guardia	Mes	Escenario	Aleatorio	Número de Ausentimos	Metros Por día
1	Mes 01	Escenario 01	0.51	2	5,756
1	Mes 02	Escenario 01	0.57	2	5,620
1	Mes 03	Escenario 01	0.84	3	4,878
1	Mes 04	Escenario 01	0.37	1	5,827
1	Mes 05	Escenario 01	0.08	0	5,432
1	Mes 06	Escenario 01	0.77	2	4,974
1	Mes 07	Escenario 01	0.46	1	5,262
1	Mes 08	Escenario 01	0.60	2	5,652
1	Mes 09	Escenario 01	0.63	2	5,068
1	Mes 10	Escenario 01	0.14	1	5,473
1	Mes 11	Escenario 01	0.77	2	5,522
1	Mes 12	Escenario 01	0.60	2	5,447
2	Mes 01	Escenario 01	0.10	1	5,842
2	Mes 02	Escenario 01	0.21	1	5,689
2	Mes 03	Escenario 01	0.08	0	4,858
2	Mes 04	Escenario 01	1.00	3	5,707
2	Mes 05	Escenario 01	0.90	3	5,421
2	Mes 06	Escenario 01	0.58	2	5,033
2	Mes 07	Escenario 01	0.52	2	5,194
2	Mes 08	Escenario 01	0.64	2	5,601
2	Mes 09	Escenario 01	0.05	0	4,915
2	Mes 10	Escenario 01	0.36	1	5,357
2	Mes 11	Escenario 01	0.88	3	5,511
2	Mes 12	Escenario 01	0.63	2	5,560
3	Mes 01	Escenario 01	0.20	1	5,829
3	Mes 02	Escenario 01	0.14	1	5,589
3	Mes 03	Escenario 01	0.39	1	5,027
3	Mes 04	Escenario 01	0.41	1	5,917
3	Mes 05	Escenario 01	0.86	3	5,413
3	Mes 06	Escenario 01	0.21	1	4,981
3	Mes 07	Escenario 01	0.62	2	5,194
3	Mes 08	Escenario 01	0.80	3	5,582
3	Mes 09	Escenario 01	0.69	2	5,081
3	Mes 10	Escenario 01	0.38	1	5,501
3	Mes 11	Escenario 01	0.86	3	5,397
3	Mes 12	Escenario 01	0.47	1	5,530
4	Mes 01	Escenario 01	0.59	2	5,810
4	Mes 02	Escenario 01	0.85	3	5,536
4	Mes 03	Escenario 01	0.45	1	5,017
4	Mes 04	Escenario 01	0.08	0	5,800
4	Mes 05	Escenario 01	0.12	1	5,552
4	Mes 06	Escenario 01	0.29	1	5,052
4	Mes 07	Escenario 01	0.46	1	5,256
4	Mes 08	Escenario 01	0.33	1	5,618
4	Mes 09	Escenario 01	0.35	1	5,088
4	Mes 10	Escenario 01	0.73	2	5,442
4	Mes 11	Escenario 01	0.56	2	5,474
4	Mes 12	Escenario 01	0.67	2	5,501

Guardia	Mes	Escenario	Aleatorio	Número de Ausentimos	Metros Por día
1	Mes 01	Escenario 02	0.85	3	5,737
1	Mes 02	Escenario 02	0.15	1	5,637
1	Mes 03	Escenario 02	0.01	0	4,878
1	Mes 04	Escenario 02	0.39	1	5,827
1	Mes 05	Escenario 02	0.09	0	5,432
1	Mes 06	Escenario 02	0.50	1	5,039
1	Mes 07	Escenario 02	0.45	1	5,262
1	Mes 08	Escenario 02	0.37	1	5,689
1	Mes 09	Escenario 02	0.67	2	5,068
1	Mes 10	Escenario 02	0.61	2	5,447
1	Mes 11	Escenario 02	0.64	2	5,522
1	Mes 12	Escenario 02	0.04	0	5,373
2	Mes 01	Escenario 02	0.32	1	5,842
2	Mes 02	Escenario 02	0.36	1	5,689
2	Mes 03	Escenario 02	0.30	1	5,075
2	Mes 04	Escenario 02	0.98	3	5,707
2	Mes 05	Escenario 02	0.44	1	5,506
2	Mes 06	Escenario 02	0.10	0	4,942
2	Mes 07	Escenario 02	0.80	3	5,135
2	Mes 08	Escenario 02	0.35	1	5,649
2	Mes 09	Escenario 02	0.30	1	5,109
2	Mes 10	Escenario 02	0.61	2	5,322
2	Mes 11	Escenario 02	0.88	3	5,511
2	Mes 12	Escenario 02	0.33	1	5,593
3	Mes 01	Escenario 02	0.49	1	5,829
3	Mes 02	Escenario 02	0.62	2	5,528
3	Mes 03	Escenario 02	0.85	3	4,944
3	Mes 04	Escenario 02	0.29	1	5,917
3	Mes 05	Escenario 02	0.92	3	5,413
3	Mes 06	Escenario 02	0.87	3	4,861
3	Mes 07	Escenario 02	0.81	3	5,155
3	Mes 08	Escenario 02	0.25	1	5,625
3	Mes 09	Escenario 02	0.04	0	5,044
3	Mes 10	Escenario 02	0.12	1	5,501
3	Mes 11	Escenario 02	0.01	0	5,397
3	Mes 12	Escenario 02	0.18	1	5,530
4	Mes 01	Escenario 02	0.03	0	5,653
4	Mes 02	Escenario 02	0.05	0	5,536
4	Mes 03	Escenario 02	0.74	2	4,998
4	Mes 04	Escenario 02	0.51	2	5,888
4	Mes 05	Escenario 02	0.82	3	5,409
4	Mes 06	Escenario 02	0.95	3	4,891
4	Mes 07	Escenario 02	0.49	1	5,256
4	Mes 08	Escenario 02	0.42	1	5,618
4	Mes 09	Escenario 02	0.16	1	5,088
4	Mes 10	Escenario 02	0.41	1	5,475
4	Mes 11	Escenario 02	0.76	2	5,474
4	Mes 12	Escenario 02	0.26	1	5,523

Guardia	Mes	Escenario	Aleatorio	Número de Ausentimos	Metros Por día
1	Mes 01	Escenario 03	0.64	2	5,756
1	Mes 02	Escenario 03	0.52	2	5,620
1	Mes 03	Escenario 03	0.50	2	4,953
1	Mes 04	Escenario 03	0.57	2	5,740
1	Mes 05	Escenario 03	0.14	1	5,550
1	Mes 06	Escenario 03	0.80	2	4,974
1	Mes 07	Escenario 03	0.98	3	5,173
1	Mes 08	Escenario 03	0.60	2	5,652
1	Mes 09	Escenario 03	0.94	3	5,027
1	Mes 10	Escenario 03	0.44	1	5,473
1	Mes 11	Escenario 03	0.65	2	5,522
1	Mes 12	Escenario 03	0.30	1	5,600
2	Mes 01	Escenario 03	0.34	1	5,842
2	Mes 02	Escenario 03	0.16	1	5,689
2	Mes 03	Escenario 03	0.79	2	5,042
2	Mes 04	Escenario 03	0.87	3	5,707
2	Mes 05	Escenario 03	0.93	3	5,421
2	Mes 06	Escenario 03	0.28	1	5,072
2	Mes 07	Escenario 03	0.73	2	5,194
2	Mes 08	Escenario 03	0.52	2	5,601
2	Mes 09	Escenario 03	0.14	1	5,109
2	Mes 10	Escenario 03	0.61	2	5,322
2	Mes 11	Escenario 03	0.59	2	5,549
2	Mes 12	Escenario 03	0.49	1	5,593
3	Mes 01	Escenario 03	0.56	2	5,726
3	Mes 02	Escenario 03	0.78	2	5,528
3	Mes 03	Escenario 03	0.32	1	5,027
3	Mes 04	Escenario 03	0.85	3	5,755
3	Mes 05	Escenario 03	0.35	1	5,558
3	Mes 06	Escenario 03	0.91	3	4,861
3	Mes 07	Escenario 03	0.39	1	5,259
3	Mes 08	Escenario 03	0.67	2	5,589
3	Mes 09	Escenario 03	0.33	1	5,087
3	Mes 10	Escenario 03	0.72	2	5,463
3	Mes 11	Escenario 03	0.16	1	5,512
3	Mes 12	Escenario 03	0.06	0	5,429
4	Mes 01	Escenario 03	0.93	3	5,653
4	Mes 02	Escenario 03	0.20	1	5,677
4	Mes 03	Escenario 03	0.35	1	5,017
4	Mes 04	Escenario 03	0.96	3	5,800
4	Mes 05	Escenario 03	0.33	1	5,552
4	Mes 06	Escenario 03	0.51	2	5,000
4	Mes 07	Escenario 03	0.50	1	5,256
4	Mes 08	Escenario 03	0.83	3	5,473
4	Mes 09	Escenario 03	0.21	1	5,088
4	Mes 10	Escenario 03	0.53	2	5,442
4	Mes 11	Escenario 03	0.05	0	5,452
4	Mes 12	Escenario 03	0.91	3	5,391