



Desafíos Tecnológicos Minería Subterránea

CODELCO 2024

Documento resumen con los principales desafíos tecnológicos en minería subterránea de Codelco, para el proceso de postulación a líneas de investigación del concurso

Piensa Minería
2024

Gerencia Corporativa de Innovación y Tecnología
Casa Matriz
www.opencodelco.cl

Tabla de contenido

Desafíos tecnológicos minería subterránea CODELCO	2
Desafíos geomecánicos.....	2
Innovación en método, variante y diseño minero.....	2
Automatización y mecanización de procesos:.....	3
Desafíos operacionales:	3
Anexo: Desafíos por División	5
Desafíos Chuquicamata Subterránea.....	5
Desafíos División El Teniente.....	7
Desafíos Tecnológicos minería del caving	9

Desafíos tecnológicos minería subterránea CODELCO

Desafíos geomecánicos

- Anticipación a las condiciones del macizo rocoso y ambiente donde realizar la minería: desarrollar métodos predictivos para prever eventos críticos, como estallidos de roca, procesos de caving, deformaciones, colapsos, etc.
Esto incluye explorar y validar hipótesis que expliquen la sismicidad previa a la explotación minera y utilizar tecnologías avanzadas para monitorear en tiempo real tanto el caving como la actividad sísmica en general, a través de la recolección y análisis de datos en tiempo real.
- Mitigación de eventos: comprender y mitigar los desafíos asociados a eventos difíciles de predecir, como por ejemplo el Estallido de Roca¹ (DET) y Air Blast (Chuquicamata)².
Establecer protocolos de mitigación específicos que consideren las diferencias geológicas y operativas de cada mina, ajustando las estrategias a aplicar según las características particulares de cada operación.
- Técnicas avanzadas de IA: explorar nuevas técnicas de inteligencia artificial, como Machine Learning, para analizar los datos históricos geomecánicos y optimizar la toma de decisiones en tiempo real, mejorando la seguridad y eficiencia operativa.

Innovación en método, variante y diseño minero

- Nuevos métodos para minería subterránea en profundidad: desafiar el estado del arte, proponiendo nuevos métodos que mejoren productividad, seguridad, costos e impacto ambiental, tomando como referencia el avance que existe, por ejemplo el Método NewDET.
- Optimización del método de exploración y diseño minero: innovar en las técnicas de exploración y diseño minero.
- Automatización del diseño minero: incorporar automatización en el diseño de operaciones mineras, desafiando las reglas tradicionales de operación.
- Fragmentación: en minería subterránea profunda, es crucial continuar mejorando el comportamiento del terreno para optimizar los diseños y prever el desarrollo de nuevos sectores, enfrentando desafíos como la estabilidad del macizo rocoso, la fragmentación variable y la hundibilidad del terreno. Además, se deben mejorar los métodos de diseño para evitar sobreexcavaciones y colgaduras, optimizar la fragmentación y automatizar los procesos unitarios. Es fundamental abordar los desafíos geomecánicos

¹ Estallido de Roca (en inglés Rockburst): los estallidos de roca consisten en fallas violentas de las paredes rocosas asociadas con proyecciones de roca con alta energía, como respuesta a la liberación instantánea de estrés en el macizo rocoso.

² Air Blast (Blown Blast / Air Gust), se conoce en español como Explosión de Aire, Tronadura de Aire, Chorro de Aire (Mx) y Pistoneo.

relacionados con la sismicidad y utilizar técnicas de fracturamiento hidráulico para mejorar la estabilidad y productividad de las operaciones.

Automatización y mecanización de procesos:

En minería subterránea profunda, es esencial incrementar la flexibilidad operativa y la capacidad productiva mediante la automatización de equipos móviles e infraestructura en procesos unitarios, como por ejemplo: manejo de materiales, muestreo, perforación y tronadura y levantamiento geomecánico.

Se deben adaptar los diseños mineros para facilitar la implementación de procesos automatizados, incluyendo la posible sustitución de excavaciones tradicionales por tecnologías mecanizadas como las Tunnel Boring Machines (TBM).

Además, es necesario desarrollar procesos unitarios autónomos que minimicen la exposición de las personas, mejorando los sistemas de soporte para gestionar las complejidades de los procesos productivos en condiciones geotécnicas desafiantes.

La automatización y mecanización pueden aplicarse a cualquier proceso unitario de la cadena de valor, para aumentar su eficiencia y seguridad, abarcando todas las áreas de la cadena de valor del negocio minero, desde la exploración hasta la producción del cátodo.

Desafíos operacionales:

En minería subterránea profunda es esencial superar la baja flexibilidad de los sistemas operacionales actuales, que presentan altos niveles de interferencia y menor rendimiento debido a factores como el polvo y la sobreexcavación. Es necesario rediseñar los procesos para reducir estas ineficiencias y desarrollar metodologías que agilicen la preparación minera.

Además, es fundamental aumentar la productividad y la fiabilidad en la explotación de minerales, con un enfoque particular en el manejo de minerales húmedos y el mantenimiento preventivo de los túneles, para evitar paradas operativas inesperadas.

Asimismo, los desafíos del management en minería subterránea en profundidad requieren la toma de decisiones en tiempo real que optimicen la producción, garantizando la seguridad de las personas y minimizando el impacto en el medioambiente. Esto puede lograrse mediante el uso de sistemas integrados de información, big data, inteligencia artificial y machine

learning, que permiten analizar datos y mejorar la eficiencia operativa a través de procesos más ágiles y precisos.

Anexo: Desafíos por División

Desafíos Chuquicamata Subterránea

Categoría	Desafío	Descripción
Geomecánicos	Estabilidad	Calibrar continuamente el comportamiento real del terreno para prever nuevos diseños o sectores. Los daños al macizo rocoso y la degradación acelerada son una preocupación clave.
	Fragmentación	Fragmentación variable según la litología. Se observan grandes fragmentos hacia el oeste y fragmentación más fina al sur. Además, el polvo representa un desafío importante en toda la cadena productiva.
	Hundibilidad	Asegurar la continuidad del caving y evaluar mecanismos para facilitar el proceso, como preconditionamiento y optimización de la geometría de extracción.
	Variante	Adaptar las características del método de block caving con variantes en alturas de hundimiento, ajustando las estrategias de incorporación y extracción a las condiciones del entorno.
Diseño minero	Rendimientos y distancias	Aumentar la flexibilidad operativa y la capacidad productiva, manejando materiales a mayores distancias y con mayor eficiencia.
	Secciones	Ajustar las secciones de las galerías en función de la calidad del macizo rocoso, considerando un factor de seguridad adecuado y optimizando el uso de equipos mineros.
	Corte basal	Asegurar el corte basal, minimizando los daños en el macizo rocoso y evitando la formación de pilares remanentes.
	Malla de extracción	Aumentar el factor de seguridad en la continuidad del flujo gravitacional, con opciones de prefabricación para reducir los tiempos de preparación minera y optimizar la recuperación de reservas.

Categoría	Desafío	Descripción
Operacionales	Continuidad operacional	Mejorar la flexibilidad de los sistemas operacionales, reducir interferencias y optimizar el manejo del polvo y el nivel de acopio en caso de fallas operativas.
Preparación minera	Calidad de desarrollos y sobreexcavación	Aumentar la calidad de los desarrollos y mitigar los problemas de sobreexcavación, que afectan el rendimiento y la seguridad operativa.
	Gestión de marinas y RISES	Independizar las rutas de marina y producción para reducir interferencias, y gestionar adecuadamente los RISES para optimizar el uso de galerías.
	Rendimientos en preparación minera	Mejorar la interacción entre áreas productivas y en preparación, acelerando el rendimiento mediante desarrollos más rápidos (e.g. Rapid Development).

Desafíos División El Teniente (DET)

Categoría	Desafío	Descripción
Geomecánicos	Fracturamiento hidráulico en ambientes de altos esfuerzos	Dado que el fracturamiento hidráulico (FH) es clave para mitigar la sismicidad y la profundización que se está experimentando en DET, es necesario estudiar como hacer FH en ambientes de altos esfuerzos.
	Estudiar si el fracturamiento hidráulico tiene efectos negativos	Actualmente en DET es necesario estudiar los potenciales efectos negativos del FH, como la concentración de esfuerzos y su impacto en el entorno.
	Interacción de cavidades	Es necesario comprender la interacción en 3D de las cavidades de explotación y cómo las reglas actuales aplican en profundidades mayores. El desarrollo de herramientas de modelamiento numérico es crucial para gestionar estas interacciones, con modelos que representen los ambientes de desarrollo y operación actuales de DET.
Productividad	Mejora en la fragmentación	Se requiere mejorar la fragmentación en los puntos de extracción para aumentar la productividad. Las pruebas iniciales han mostrado resultados preliminares positivos, pero aún no concluyentes.
Automatización	Automatización de procesos unitarios	Se busca desarrollar procesos unitarios autónomos (más allá de camiones y martillos) que minimicen la exposición de las personas y mejoren la eficiencia operativa. Por ejemplo: manejo de materiales, muestreo, perforación y tronadura y levantamiento geomecánico.
Operacionales	Explotación de minerales húmedos (Agua-Barro)	La explotación de minerales húmedos representa un desafío significativo en términos de manejo y procesos productivos.
Diseño minero	Sobreexcavaciones	Las sobreexcavaciones en la construcción de túneles y dificultades en la geometría de las explotaciones son desafíos recurrentes que impactan tanto en la productividad como en la seguridad. Por ello se buscan métodos y herramientas que ayuden a los ejecutores a tener mejor resultado en la implementación.

Categoría	Desafío	Descripción
Geomecánicos	Deterioro del sistema de soporte	Entender el deterioro de los sistemas de soporte después de eventos sísmicos es clave para garantizar la seguridad. Es necesario implementar mantenimiento preventivo de los sistemas de fortificación y determinar dónde hacerlo considerando el tamaño de la mina.
Sismicidad	Detección de patrones sísmicos	Se requiere mejorar la analítica avanzada para detectar patrones de sismicidad y emplear estos datos como alertas tempranas. Esto es crucial para reducir el riesgo de eventos sísmicos mayores.
Mantenimiento	Mantenimiento preventivo de túneles	Asegurar un mantenimiento preventivo efectivo de túneles, así como mejorar el manejo de "inchancables", para mantener la continuidad operativa. Otro desafío asociado a este tema es la búsqueda de nuevos materiales de soporte.
Soporte de sistemas	Mejoramiento de los sistemas de soporte	Optimizar los sistemas de soporte es esencial para asegurar la estabilidad y longevidad de las estructuras subterráneas.

Desafíos tecnológicos minería del caving

Categoría	Desafío	Descripción
Geomecánica	Estabilidad del macizo rocoso	Calibrar el comportamiento del terreno y anticipar la subsidencia y otros eventos críticos para optimizar el diseño minero y garantizar la seguridad.
Fragmentación	Control de fragmentación	Mejorar la predictibilidad de la fragmentación y ajustar los métodos de extracción para aumentar la productividad, considerando la variabilidad litológica.
Automatización	Automatización de procesos	Desarrollar tecnologías avanzadas que permitan la automatización de procesos en áreas críticas como perforación, tronadura y carguío, mejorando la seguridad y reduciendo costos operativos.
Fracturamiento	Fracturamiento hidráulico	Incorporar el fracturamiento hidráulico como una técnica para mejorar la eficiencia del caving, reduciendo la sismicidad inducida y mejorando la productividad en sectores con alta resistencia del macizo rocoso.
Sismicidad	Monitoreo y control de eventos sísmicos	Implementar sistemas avanzados de monitoreo en tiempo real para detectar patrones sísmicos y mitigar el riesgo de eventos catastróficos.
Diseño minero	Optimización de mallas de explotación	Evolucionar el diseño de las mallas para optimizar la extracción de mineral, considerando las diferencias geológicas entre los sectores.
Construcción	Mejora de los piques de traspaso de mineral	Optimizar el diseño y la construcción de piques para mejorar la eficiencia del traspaso de mineral y reducir los tiempos muertos asociados a su mantenimiento.
Mantenimiento	Mantenimiento predictivo de túneles y galerías	Implementar sistemas de mantenimiento predictivo para reducir fallas en túneles y galerías, asegurando la continuidad operativa y la seguridad en las zonas de producción y desarrollo.

Categoría	Desafío	Descripción
Riesgos operacionales	Control del agua y polvo en las operaciones subterráneas	Gestionar el bombeo de agua y polvo en las operaciones, que representan riesgos operacionales significativos en minería subterránea, afectando la visibilidad, la salud de los trabajadores y la eficiencia de los equipos.
Innovación tecnológica	Preacondicionamiento y reducción secundaria para mejorar la eficiencia del caving	Implementar el preacondicionamiento del terreno y técnicas de reducción secundaria para mejorar la eficiencia de los procesos de hundimiento y extracción.