

# PERSPECTIVA N°10

---

***OPTIMIZACIÓN EN MINERÍA***



# OPTIMIZACIÓN EN MINERÍA

Valentina Chico, Gonzalo Compan  
GEM | Gestión y Economía Minera Ltda.

## MOTIVACIÓN: REDUCCIÓN DE COSTOS EN MINERÍA

Luego del ciclo de altos precios de los *commodities*, en donde las problemáticas estaban más relacionadas con la producción que con otros factores, los bajos precios tienen inmersa a la industria minera casi en su totalidad en una etapa de reajuste. En ella se debe lograr calzar nuevamente los costos y los precios de venta, para de esta forma llegar a niveles de rentabilidad aceptable para los dueños. Este tema es especialmente crítico para operaciones que lograron extender su vida en base al precio de los *commodities*, que ahora deben intentar bajar sus costos para ser rentables.

Dejando a un lado el precio de los insumos (no controlables en general por las empresas mineras), la única forma que

*Los bajos precios tienen inmersa a la industria minera casi en su totalidad en una etapa de reajuste. En ella se debe lograr calzar nuevamente los costos y los precios de venta.*

*La optimización de procesos, en términos generales, tiene dos enfoques: local y global o sistémico.*

tienen las compañías mineras para reducir los costos operativos corresponde a la optimización de procesos. En este sentido existen diferentes herramientas que es posible aplicar, pero siempre con el mismo objetivo de añadir valor al negocio. La optimización de procesos, en términos generales, tiene dos enfoques: local y global o sistémico. Adicionalmente, dada la alta incertidumbre asociada a los procesos mineros, muchas veces es necesario integrar a los modelos elementos de incertidumbre. En esta Perspectiva se desarrollarán ambos enfoques y se mostrarán ejemplos prácticos de ellos.

GEM, a lo largo de sus seis años de experiencia, ha desarrollado proyectos de optimización tanto con un enfoque local como sistemático, pudiendo demostrar siempre que la optimización es una herramienta eficaz para agregar valor al negocio minero.

# TIPOS DE OPTIMIZACIÓN Y ENFOQUES

## LA OPTIMIZACIÓN

En minería existen múltiples procesos con innumerable cantidad de variables cada uno. Adicionalmente, frecuentemente estas variables ni siquiera son conocidas con certidumbre. Es por esta razón que la optimización de procesos muchas veces se hace aún más complicada y vuelve necesario el uso de herramientas especializadas.

Actualmente en minería se toman algunas decisiones en forma heurística, gracias a la experiencia de los operadores, profesionales y ejecutivos. Estas decisiones, aunque en su mayoría convergen al óptimo o a algo muy cercano a éste, muchas veces se enfocan en un ámbito local y no consideran toda la cadena de valor de la compañía.

El primer paso para cualquier tipo de optimización es detectar espacios de mejora. Esto puede hacerse de diferentes formas, desde la aparición de ideas dentro del propio equipo como a través del uso de agentes externos que detecten posibles brechas. El próximo paso corresponde a la modelación del problema de optimización para así, a través de la herramienta elegida, encontrar la estrategia óptima. El tercer paso es la implementación, cuyos resultados deben ser evaluados y en el caso de ser necesario ajustar los modelos para iterar y llegar a los resultados esperados.

Debido a la complejidad de la optimización de procesos en minería, muchas veces es necesario separar el problema en partes. La optimización aislada de cada uno de estos procesos se conoce como optimización local. Por otro lado, es posible identificar ciertas variables que pueden ser modeladas de una manera sistémica, es decir, considerando todo el sistema o cadena de valor. Este tipo de variables pueden ser optimizadas de una manera global, tomando en cuenta las interacciones entre cada subproceso. Utilizando este tipo de optimización es posible asegurar que la estrategia encontrada corresponde a un óptimo global.

## OPTIMIZACIÓN LOCAL

La optimización local toma mayor relevancia en problemas altamente complejos, cuando existen cuellos de botella o cuando los procesos son independientes entre sí. Cada vez

que se busca un óptimo local se debe tener cuidado de no afectar procesos aguas abajo, ya que en general, el óptimo de una variable de un proceso puede afectar el desempeño de las siguientes.

En el pasado, GEM ha tenido la oportunidad de trabajar en conjunto con distintas operaciones mineras realizando optimizaciones locales con miras al negocio completo. Uno de estos proyectos correspondió al estudio del reemplazo de tolvas de camiones mineros de alto tonelaje, en donde se analizó en forma local cómo desarrollar la mejor estrategia en términos de costos, modelando para esto el comportamiento de las fallas de las mismas, es decir buscando una solución local bajo incertidumbre. Con tal fin se incorporaron al análisis no solo costos operacionales, sino que también costos de capital y consideraciones financieras a nivel de flujos de caja. La evaluación utiliza el concepto de Costo Anual Uniforme Equivalente (CAUE), metodología estándar en el análisis de productividad de equipos y componentes mineros. El CAUE se define como:

$$CAUE = F \times \left( \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \right) \quad (1)$$

Donde  $F$  corresponde a la suma de los flujos de caja descontados,  $i$  es la tasa de descuento y  $n$  es el horizonte de evaluación. En este estudio se incorporan riesgos asociados al CAUE, de tal forma de evaluar las distintas estrategias de mantenimiento.

Para la solución final se consideraron una serie de posibles estrategias, las que se muestran en la **TABLA 1**.

*La optimización local toma mayor relevancia en problemas altamente complejos, cuando existen cuellos de botella o cuando los procesos son independientes entre sí.*

**TABLA 1. RESUMEN DE ESTRATEGIAS CONSIDERADAS**

Estrategia	Descripción	Costos Asociados	Riesgos y Beneficios
Estrategia Actual	Compra de tolva y reparaciones del tipo <i>overhaul</i> luego de falla	La adquisición de una tolva nueva y los costos por reparación de la misma	El riesgo de falla es asumido por la compañía
Suma Alzada	Se paga un costo fijo anual/mensual que garantiza las reparaciones correctivas	El proveedor tendrá la misma estructura de costos que la Estrategia Actual, pero cobrará un precio fijo (que le permita tener margen)	El riesgo de falla es asumido por el proveedor
Arriendo Tolvas	Las tolvas pertenecen al proveedor y se paga un monto anual o mensual por ellas	Similar a la Suma Alzada, pero considera retorno adicional del proveedor por la inversión de la tolva	El riesgo de falla es asumido por el proveedor
Mantenimiento Preventivo	Se realizan mantenciones preventivas transcurridas cierta cantidad de horas útiles. Esta estrategia considera también el costo de mantenciones correctivas	La misma estructura de la Estrategia Actual, considerando un menor costo para el caso de mantenciones preventivas y el costo por pérdida de producción al camión detenido durante el periodo de mantenimiento	El riesgo de falla es asumida por la compañía
Uso Tolva Liviana	Uso de tolvas de menor peso, con reemplazo en caso de falla	Solo se consideran costos por inversión cada vez que se compra una tolva nueva	El riesgo de falla es asumido por la compañía y existe un potencial beneficio asociado a mayor transporte de material
Costo Por Hora Útil	Similar a la estrategia de suma alzada, pero se cobra por hora útil en lugar de hora cronológica	El proveedor tendrá la misma estructura de costos que la Estrategia Actual, pero cobrará un precio unitario por hora útil	El riesgo es asumido por el proveedor

## ¿QUÉ ES Y PARA QUÉ SIRVE LA TEORÍA DE JUEGOS?

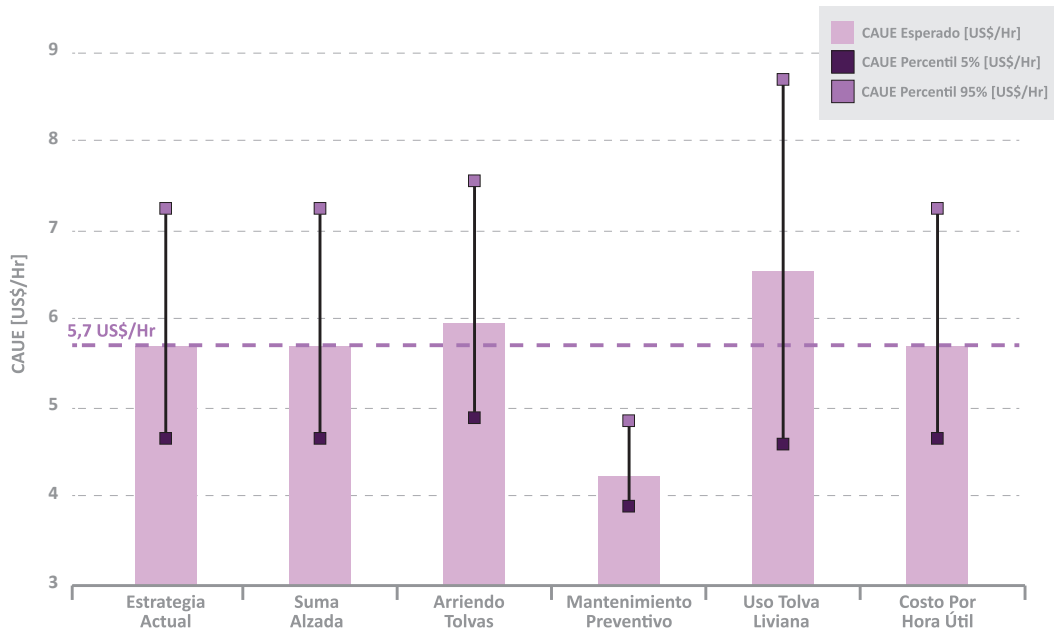
La teoría de juegos es un área de las matemáticas que utiliza modelos para estudiar cómo son tomadas las decisiones en problemas en que cada parte tiene incentivos diferentes. En la práctica, la teoría de juegos sirve para encontrar estrategias óptimas o el comportamiento previsto en diferentes escenarios. Por ejemplo, sirve para analizar el comportamiento de las partes en licitaciones y competencia entre empresas con poder de mercado.

Dentro de los riesgos considerados, las variables modeladas con incertidumbre fueron las siguientes:

- Disponibilidad de camiones.
- Utilización de camiones.
- Duración de tolva nueva.
- Duración de tolva liviana nueva.
- Duración de tolva reparada.
- Duración de tolva mantenida preventivamente.
- Tonelaje adicional de tolva liviana.

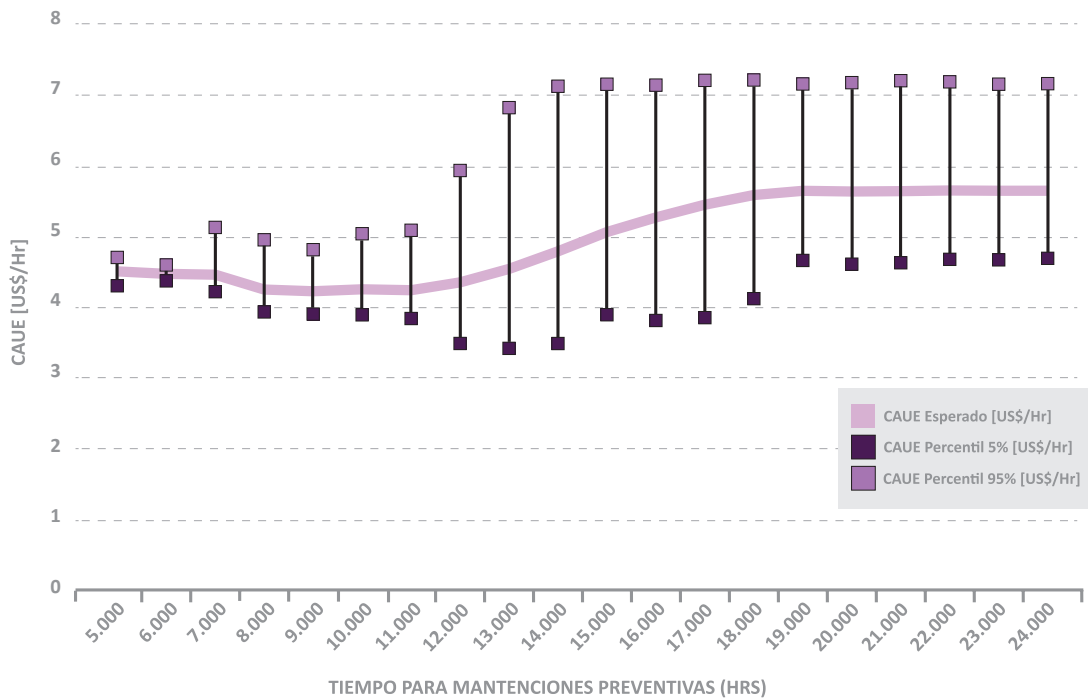
Cada una de las variables con incertidumbre fue analizada, para luego ajustar la distribución que mejor representara el comportamiento de cada una de ellas. Luego de múltiples iteraciones a los modelos desarrollados, se obtuvieron los resultados mostrados en la **FIGURA 1.**, en donde las horas corresponden siempre a horas útiles.

FIGURA 1. COMPARACIÓN CAUE DISTINTAS ESTRATEGIAS



Luego de un análisis de sensibilidad, se determinó que en base a los parámetros supuestos la estrategia de Mantenimiento Preventivo poseía el menor CAUE esperado y riesgo para la compañía. Esto determina un ahorro esperado de alrededor de 25% con respecto a la estrategia actual.

FIGURA 2. TIEMPO ÓPTIMO PARA MANTENCIONES PREVENTIVAS



Durante el proyecto, se estudió el tiempo óptimo para las mantenciones preventivas. De esta manera se logró determinar que este se encontraba entre las 8.000 y 10.000 horas útiles, tal como se muestra en la **FIGURA 2**.

Este proyecto es un ejemplo claro de los beneficios que tiene la optimización local, cuando esta es independiente de los procesos aguas abajo. Adicionalmente, para proyectos que incluyen una etapa de licitación, es posible añadir al estudio una fase de análisis de teoría de juegos para así encontrar la estrategia óptima de la compañía que permita obtener los mejores resultados posibles en la licitación.

## OPTIMIZACIÓN GLOBAL O SISTÉMICA

La optimización sistémica corresponde a la que considera toda la cadena de valor. Este tipo de optimización, a diferencia de la optimización local, permite asegurar que la estrategia óptima encontrada corresponde al global de la operación, y que se toman en cuenta todas las interacciones existentes. Así, es posible que lo que era un óptimo local en un proceso no aparezca en la estrategia óptima global.

Un ejemplo de la optimización sistémica es la metodología *Mine to Mill*. El concepto de optimización *Mine to Mill* hace referencia a un enfoque sistémico para la reducción del consumo y costo de energía en el proceso de reducción de tamaño. Este fue desarrollado en el Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre (JKMRC) en Queensland, Australia (Adel, Kojovic, & Thornton, 2006). El principio fundamental corresponde a que dado los diferentes costos de energía en la perforación, tronadura, chancado y molienda, es posible llegar a un óptimo global en cuanto al costo de la energía utilizada. La función objetivo de la optimización puede describirse como sigue:

$$\begin{aligned} \text{Min}(E_{\text{Perforación}} * C_{\text{Perforación}} + E_{\text{Tronadura}} * C_{\text{Tronadura}} \\ + E_{\text{Molienda}} * C_{\text{Molienda}}) \\ + E_{\text{Chancado}} * C_{\text{Chancado}} \end{aligned} \quad (2)$$

*La optimización sistémica corresponde a la que considera toda la cadena de valor. Este tipo de optimización, a diferencia de la optimización local, permite asegurar que la estrategia óptima encontrada corresponde al global de la operación, y que se toman en cuenta todas las interacciones existentes.*

En donde  $E_i$  corresponde a la energía consumida en la etapa  $i$ , y  $C_i$  corresponde al costo unitario de la energía de la etapa  $i$ .

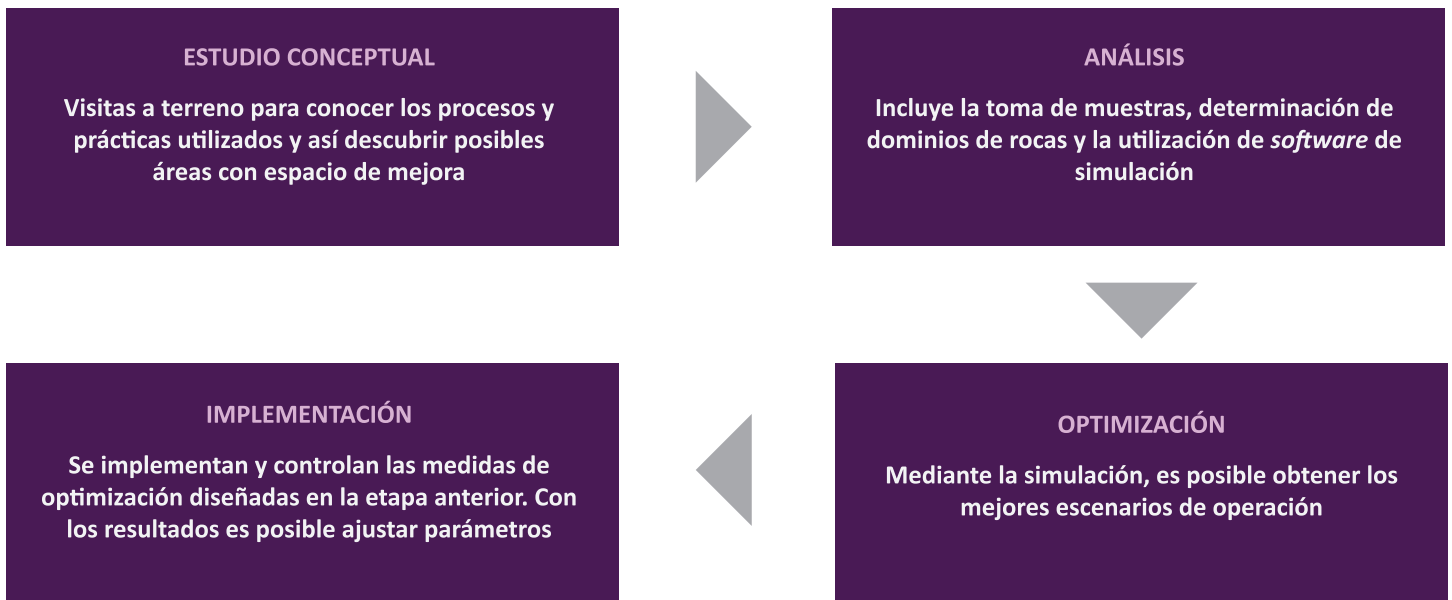
Este enfoque incluye fases de muestreo y caracterización, modelamiento, simulación y optimización. A diferencia de enfoques de optimización local, un enfoque sistémico permite utilizar las ventajas comparativas entre diferentes etapas en pos de obtener un mejor resultado global de la operación. La optimización *Mine to Mill* muchas veces exige la transferencia tecnológica hacia la industria.

Las cuatro etapas de la optimización *Mine to Mill* se muestran en la **FIGURA 3**.

Un ejemplo claro de este tipo de optimización corresponde al diseño óptimo de la tronadura para bajar los costos de energía. Esto puede hacerse a través de dos vías: bajando la energía consumida en el chancado y molienda debido a una granulometría de menor tamaño o aumentando el *throughput* de la planta y así obtener un menor consumo unitario. El proceso es iterativo, tal como ilustra la **FIGURA 4**, y al final de cada ciclo debe evaluarse con los modelos desarrollados los ajustes pertinentes.

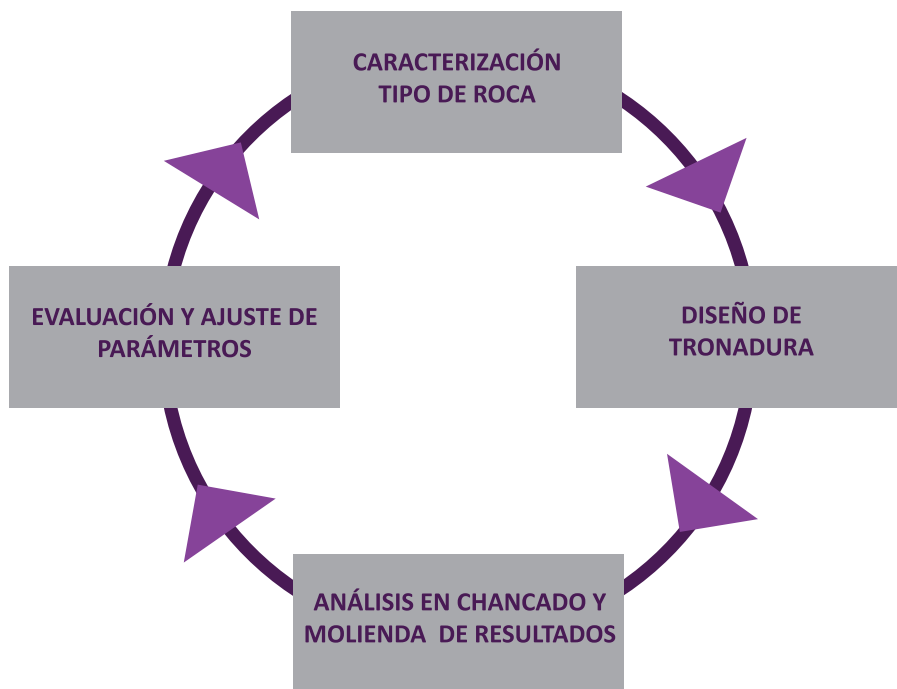
Otro ejemplo corresponde al aumento del *throughput* del molino SAG en la mina Porgera, en Papua New Guinea, donde por medio de la aplicación del concepto *Mine to Mill* los estudios revelaron la posibilidad de, al optimizar

FIGURA 3. ETAPAS OPTIMIZACIÓN MINE TO MILL



el diseño de la tronadura, llegar hasta a un aumento de 25% en la capacidad de tratamiento (Grundstrom, Kanchibotla, Jankovich, & Thornton, 2001).

FIGURA 4. ETAPAS OPTIMIZACIÓN DISEÑO DE TRONADURA

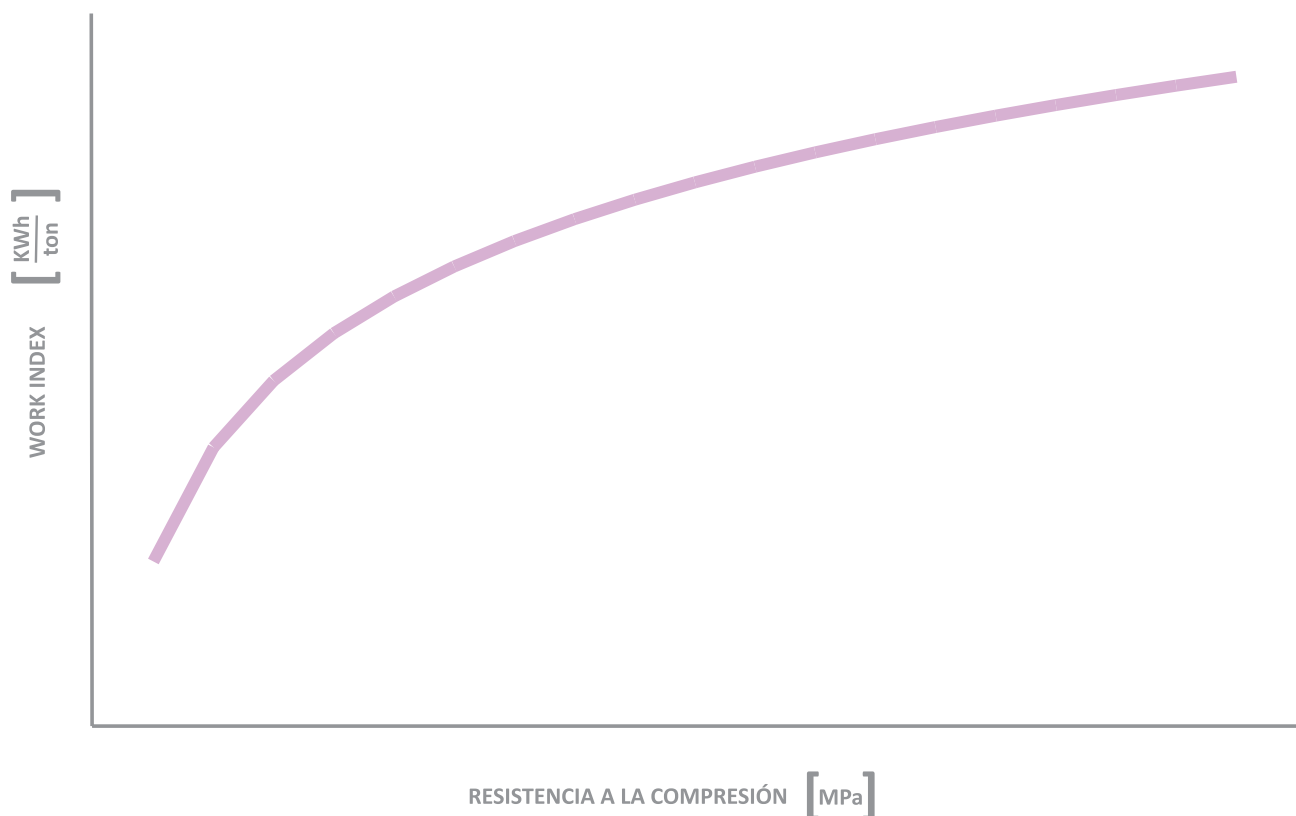


Por ejemplo, para un tipo de roca con un alto *Work Index* se podrían obtener mejores resultados al aumentar la energía utilizada en la tronadura y así obtener una granulometría más pequeña, que en el chancado y molienda permita disminuir el consumo de energía para llegar al tamaño de partícula deseado. Por otro lado, para un tipo de roca con un *Work Index* medio o bajo, un aumento en la energía utilizada en la tronadura no necesariamente supondrá mejores resultados. Esto debido a que el bajo *Work Index* puede implicar que el costo extra en la perforación y tronadura no compense el ahorro en el chancado y molienda. Al mismo tiempo, estudios han mostrado que sobre cierto umbral un cambio en la energía durante la tronadura no necesariamente implicará mejores resultados, ya que el *Work Index* alcanza una meseta, tal como se muestra en la **FIGURA 5**. (Abdel Hafez, 2012; Park, Compan & Kim, en prensa).

## COMENTARIOS FINALES

Actualmente la industria minera enfrenta un gran desafío: ser capaz de bajar los costos de operación para ser sustentable en el tiempo. En este sentido la optimización de procesos juega un papel fundamental. Si bien una optimización sistemática de toda la cadena de valor es el ideal, debido a que se asegura el encontrar una estrategia óptima que entregue el mayor valor al negocio, la optimización local también puede mejorar los resultados. Cuando un proceso es altamente complejo, cuando existen cuellos de botella o cuando los procesos son independientes entre sí la optimización local juega un papel fundamental. En términos generales, cuando la optimización global o sistemática se hace muy compleja o simplemente no es posible de realizar, la optimización local es la opción más viable.

FIGURA 5. RELACIÓN WORK INDEX Y RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN





La optimización en minería es altamente no trivial, debido a que no solamente el sistema completo se encuentra altamente interconectado sino que además existen una serie de incertidumbres asociadas a variables, se hace necesario el uso de herramientas especializadas que incluyan, por ejemplo, el análisis de simulación.

Si bien quienes trabajan en las operaciones buscan mejorar los procesos día a día, muchas veces es necesaria una visión externa que permita encontrar brechas no identificadas aun o tener una visión global del negocio. En este sentido, en la experiencia de GEM trabajando con múltiples operaciones en búsqueda de la estrategia óptima que permita agregar valor al negocio, existen espacios en la industria minera para ganar ahorros o aumentos de valor de hasta un 5%.

*Si bien quienes trabajan en las operaciones buscan mejorar los procesos día a día, muchas veces es necesaria una visión externa que permita encontrar brechas no identificadas aun o tener una visión global del negocio.*

## REFERENCIAS

- Abdel Hafez, G. S. (2012). Correlation between bond work index and mechanical properties of some saudi ores. *Journal of Engineering Sciences*, 40(1), 271-280.
- Adel, G., Kojovic, T., & Thornton, D. (2006). *Mine-to-Mill Optimization of Aggregate Production*. Blacksburg: Virginia Polytechnic Institute & State University.
- Grundstrom, C., Kanchibotla, S. S., Jankovich, A., & Thornton, D. (2001). Blast fragmentation for maximising the sag mill throughput at Porgera Gold Mine. *Proceedings of the Twenty-Seventh Annual Conference on Explosives and Blasting Technique*, 1(1), 383-399.
- Park, J., Compan, G., & Kim, k. (en prensa). Uso de la tasa de penetración durante la perforación para la determinación de propiedades de conminución. *Tecnología Minera*.

### VALENTINA CHICO

Ingeniero Civil Industrial mención Minería de la Pontificia Universidad Católica de Chile.

[vchico@gem-ing.cl](mailto:vchico@gem-ing.cl)

### GONZALO COMPAN

Ingeniero Civil Industrial mención Minería de la Pontificia Universidad Católica de Chile, y Magister en Ciencias de la Ingeniería de la Pontificia Universidad Católica de Chile.

[gcompan@gem-ing.cl](mailto:gcompan@gem-ing.cl)

## ACLARACIÓN

Este documento ha sido publicado por GEM|Gestión y Economía Minera Ltda. bajo el entendimiento de que su responsabilidad está limitada a proveer una opinión profesional e independiente. Aunque su preparación ha involucrado dedicación y cuidado razonables, GEM no garantiza la precisión del conjunto de datos, supuestos, predicciones ni de otras afirmaciones realizadas. Si el usuario utiliza este documento o su información para obtener recursos o tomar cualquier tipo de decisión que involucre otras compañías, GEM no acepta responsabilidad alguna frente a terceros, sin importar su proveniencia y sin limitaciones.

El presente reporte ha sido elaborado utilizando la Nueva Ortografía de la Lengua Española (RAE, 2010).

Este servicio ha sido entregado bajo los controles establecidos por un Sistema de Gestión de la Calidad aprobado por Bureau Veritas Certification conforme con ISO 9001. Número de Certificado: 8309

## CONTACTO

**WEB:** [www.gem-ing.cl](http://www.gem-ing.cl)

**TELÉFONO:** + 56 2 2225 30 21

**AGRADECEMOS ENVIAR SUS COMENTARIOS DE ESTE ARTÍCULO AL**

**EMAIL:** [contacto@gem-ing.cl](mailto:contacto@gem-ing.cl)

© Gestión y Economía Minera Ltda. (GEM), 2015. Derechos Reservados