



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

DIVISIÓN DE INGENIERÍA EN CIENCIAS DE LA TIERRA

Facultad de Ingeniería

“Estudio económico comparativo entre un proceso de trituración primaria en interior mina y su posterior manto y un proceso de manto directo a superficie de mineral sin triturar”.

TESINA

Que para obtener el título de Ingeniero de Minas y Metalurgista

PRESENTA:

Alan Felipe Gómez Reyes

DIRIGIDA POR:

M. en A. Gabriel Ramírez Figueroa

Ciudad Universitaria

2014



JURADO ASIGNADO

PRESIDENTE

Ing. Carl Anthony Servin Jungdorf

SECRETARIO

M. en C. José de Jesús Huevo Casillas

VOCAL

M. en A. Gabriel Ramírez Figueroa

1^{er.} SUPLENTE

M. en A. José Enrique Santos Jallath

2^{do.} SUPLENTE

Ing. Mauricio Mazari Hiriart

A mis padres: Estela Victoria y Benito Gómez

CONTENIDO	
RESUMEN	6
I. INTRODUCCIÓN	7
II. HIPOTESIS Y OBJETIVO	9
2.1. Objetivo general.	10
2.1.2. Objetivos específicos.	10
III. MARCO TEÓRICO	11
3.1. Sistemas alternativos de extracción de mineral en operaciones subterráneas	11
3.1.2. Ventajas y desventajas de los sistemas alternos	13
3.1.3. Ventajas y desventajas en el sistema de manto convencional	14
3.1.4. Ventajas y desventajas en el sistema de manto empleando una banda vertical	15
3.2. Importancia de la disminución del tamaño	18
3.3. Generalidades de la trituración en el interior de la mina.	18
3.4. Dimensionamiento de una planta de trituración.	19
3.4.1. Capacidad.	19
3.5. Clasificación y manejo del sobretamaño en la trituración en el interior de la mina.	20
3.5.1. Puntos en contra de la clasificación de tamaño previa a la trituración.	23
3.6. Instalación de maquinaria y disposición de la trituradora primaria en el interior de la mina.	24
IV. DESARROLLO	28
4.1. Metodología.	28
4.2. Reglas Generales (<i>Rules of thumb</i>).	29
4.3. Consideraciones generales de la evaluación económica.	30

V. ESTUDIO DE CASO Y ANÁLISIS DE DATOS	33
5.1. Estimación de costos y análisis financiero.	33
5.2. Costo de operación por tiro.	33
5.2.1. Costos e inversión.	34
5.3. Inversión inicial.	35
5.4. Costos directos.	35
5.5. Valor de concentrado.	36
5.6. Deducciones.	37
5.7. Estado de resultados.	37
VI. EVALUACIÓN DE RESULTADOS	39
6.1. Evaluación económica.	39
6.1.2. Criterios de evaluación.	39
6.1.3. Caso A. Trituración en superficie, \$1.24/ton.	40
6.1.4. Caso B. Trituración en interior mina, \$1.12/ton.	40
6.2. Resultados comparativos.	41
6.3. Tasa interna de retorno.	41
6.4. Modelo matemático.	42
VII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	43
AGRADECIMIENTOS	44
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	45

RESUMEN

La trituración es un proceso de reducción del mineral comprendido entre los tamaños de entrada de 1 metro a 1 centímetro (0,01m), diferenciándose en trituración primaria (de 1 m a 10 cm) y trituración secundaria (de 10 cm a 1 cm)¹.

Tales procesos de preparación mecánica de minerales se llevan a cabo en la superficie, una vez que el mineral ha sido extraído de la mina.

Por otra parte, en algunas operaciones mineras modernas, el proceso de trituración primaria se ha transferido al interior de la mina; no obstante, dado que cada situación es evaluada en forma individual, se pretende conocer el costo-beneficio unitario entre dichas opciones que fundamenten la conveniencia de instalar o no un proceso de trituración en el interior de una mina.

Ya sea que el mineral se triture o no en el interior de la operación, este requiere ser transportado hasta superficie para ser procesado en una planta de beneficio. El proceso de manto consiste básicamente en la extracción del mineral por medio de botes de manto del interior de mina a superficie ó puede emplearse camiones para el acarreo por rampa a superficie y bandas, puede también bombearse como pulpa a la superficie.

Se presenta en este trabajo una comparación económica con base en un modelo hipotético, entre instalar la trituradora primaria en el interior de la operación o hacerlo en superficie, tal comparación hace inclinarse sobre la primera opción, ya que reditúa mayores beneficios económicos que hacerlo en superficie:

- A lo largo de la duración del proyecto evaluado, se tiene una diferencia favorable de \$3, 464,460.51, lo cual hace recomendable el triturar en el interior de la mina, ya que permite una recuperación de la inversión mayor respecto de triturar en superficie.
- La eficiencia en el manto es un 10% mayor triturando en el interior de la mina por la reducción granulométrica, reduciéndose los costos de mantenimiento.
- La inversión de triturar en el interior es 8% mayor respecto del caso de hacerlo en superficie, sin embargo esta diferencia es justificada por el porcentaje de aumento en la utilidad (3.40%)

¹ **Fuente:** Gerencia Corporativa de Proyectos Mineros, *Infraestructura de mina. SAPSA 2012*

ABSTRACT

Comminution is an ore reduction process between input sizes from 1 meter to 1 centimeter (0.01 m), differing in primary crushing (1 m to 10 cm) and secondary crushing (from 10 cm to 1 cm).

Traditionally, such mechanical preparation processes are often done on the surface, once the mineral has been extracted.

In other hand, in some modern mining operations, the primary crushing process has been transferred into the mine, however, since each situation is individually evaluated, it's necessary to understand the unitary cost -benefit among those options to substantiate the convenience of whether installing or not a crushing process inside the mine.

Whether the ore is crushed or not inside the mine, it needs to be transported to the surface to be processed in a processing plant. *Hoisting* process consists basically of the ore extraction using skips to the surface or using trucks for hauling by ramp to the surface

It is presented in this paper an economic comparison between installing a primary crusher station inside the mine versus doing the comminution operation on the surface, such comparison favors the first option because it pays off greater economic benefits than the other one:

- Throughout the duration of the evaluated project, there is a favorable difference of \$ 3,464,460.51, which makes it advisable to do the comminution inside the mine, since it allows a greater payback than surface grinding.
- Efficiency in the *hoisting* is 10% greater crushing inside the mine
- The investment of crushing inside is 8% higher compared to the case on surface, however this difference is justified by the percentage of increased income (3.40 %)

I. INTRODUCCION

El contenido del presente trabajo persigue la finalidad de proporcionar una respuesta al planteamiento sobre la conveniencia de implantar un proceso de trituración primaria en el interior de una mina y, de ser factible tal implementación, hasta qué grado resulta económicamente benéfico comparado con el tradicional manto de mineral a superficie y su posterior preparación mecánica.

Tradicionalmente, dichos procesos de preparación mecánica de minerales se han llevado a cabo en la superficie, una vez que el mineral ha sido extraído de la mina.

Por otra parte, en algunas operaciones mineras modernas el proceso de trituración primaria se ha transferido al interior de la mina; no obstante, dado que cada situación se evalúa en forma individual, se plantea realizar un análisis financiero entre dichas opciones para generar la información necesaria para fundamentar la conveniencia de instalar un proceso de trituración en el interior de una mina.

Se pretende mostrar entonces, una metodología de análisis financiero para aplicarse como base orientativa para la toma de decisiones en las operaciones mineras en México de acuerdo a sus particularidades de cada operación. Para ello se partirá de un enfoque general cuyo propósito consista en servir de fundamento para la aplicación del resultado de manera particular, esto es, deducir el grado de certeza a partir del presente análisis.

Para lo anterior se toma como partida un caso hipotético de una operación minera cuyo yacimiento en cuestión cuenta con 8, 400,000 toneladas de mineral probadas, con una ley de 250 gramos de plata asumiendo que el proceso de concentración es por medio de flotación con una recuperación de valores del 89%, considerándose una planta con capacidad de 4,000 toneladas por día. La ubicación del denuncia minero es en un área de acceso relativamente fácil contando con agua para el proceso

Con base en las especificaciones anteriores, se presentan dos alternativas económicas. En la primera, (caso A) se analizan los costos de la operación minera efectuando la trituración del mineral en superficie; mientras que en la segunda, (caso B) tiene lugar en el interior de la mina. Dichas comparaciones tienen la finalidad de determinar el impacto de la trituración como variable de decisión, permaneciendo como fijas las variables de distancias de manto en ambos casos.

II. HIPOTESIS Y OBJETIVO

Se presenta la formulación de la hipótesis misma que a continuación se indica: *“La trituración en interior mina torna más eficiente el manto, generando un flujo de caja positivo tomando en cuenta el periodo de recuperación de la inversión, en contraparte con un manto sin previa trituración a distancias similares”*.

Con lo anterior se pretende mantener fija la variable distancia, es decir, analizar el caso con distancias similares de manto, con la finalidad de comparar escenarios *equivalentes* en las que el proceso de trituración funja como la única variable dentro del factor de decisión económico. En otras palabras, se busca conocer el alcance y ponderación de esta etapa de preparación mecánica a lo largo del proceso de extracción

Podrá discreparse en contra de lo anterior, argumentando la gran variabilidad de los casos *reales* como pueden ser la ubicación de la estación de trituración, los niveles y las distancias de manto y/o acarreo, etc. Sin embargo, si el problema se focaliza únicamente en el dimensionamiento de la importancia de triturar o no en el interior de la mina para conocer los porcentajes de mejora en el proceso de extracción en general, dichas variables deberán mantenerse constantes e independientes.

Desde luego que más adelante, estas variables deberán ser estudiadas y evaluadas en cada caso particular. En este trabajo, sólo se pretende determinar *cuantitativamente* el valor agregado al proceso-en caso de existir- al llevar a cabo la trituración primaria en el interior de la mina.

2.1. Objetivo general

Realizar un estudio comparativo para determinar la conveniencia o no de instalar un proceso de trituración en el interior de una mina.

2.1.2. Objetivos específicos

Demostrar o rechazar que: *“La trituración en interior mina torna más eficiente el manto, generando un flujo de caja positivo tomando en cuenta el periodo de recuperación de la inversión, en contraparte de un manto sin previa trituración a distancias similares”*

Cabe hacer mención que el caso que se evaluará será tal como se menciona líneas atrás, aquél en el cual las distancias de manto sean constantes, siendo la variable *trituración* independiente de la distancia, ya que en un caso se evalúa el proceso con la trituración primaria en el interior de la mina y en el segundo la trituración tiene lugar en la superficie.

III. MARCO TEORICO

Tradicionalmente, en la minería subterránea se ha optado por realizar la trituración primaria del mineral en superficie. Esto de manera general sucede en la planta de beneficio con una consecutiva reducción del mineral a granulometrías propicias para la molienda y posterior liberación de la partícula de interés económico. Una de las razones por la cuales se ha optado por esta solución, tiene que ver con la aparente conveniencia económica que implica el tener en superficie y estratégicamente dispuestas las etapas de trituración sin la limitación de espacio.

Recientemente se han desarrollado equipos de trituración primaria más eficientes en su consumo energético y su construcción, en los cuales los sistemas de control automatizados han desempeñado un papel relevante en su desempeño, permitiendo la reducción de tamaño del mineral en el interior de la mina para incrementar la eficiencia en su extracción; pero cabe preguntarse, ¿hasta qué grado esta ganancia en la eficiencia del manto justifica el triturar el mineral en el interior de la mina?

Bajo una óptica general, cada sistema tendrá sus ventajas y desventajas en función de los objetivos y necesidades específicas de cada operación. En la minería subterránea, la técnica de manejo de la carga mediante tiros y botes de manto –*skips*– ha presentado un significativo avance, principalmente en lo que concierne a los sistemas de control; cabe destacar también, que recientemente se han comenzado a utilizar sistemas alternativos de extracción, cada uno de ellos con sus particularidades, ventajas y desventajas:

- Sistemas de extracción por medio de bandas transportadoras convencionales
- Sistemas de extracción por bandas transportadoras de alta inclinación (*High/Steep Angle Conveyors, Sandwich Conveyor*).
- Sistemas de extracción por bombeo de pulpas por tuberías- previa molienda en el interior de la mina- (*Hydraulic Hoisting*)
- Sistema convencional de acarreo en rampa con camiones mineros.
- Otros sistemas de manejo de carga no convencionales como los denominados sistemas de transportación por bandas en forma tubular (*Pipe Conveyor Systems* o los sistemas de transportación por bandas cerradas (*Closed Conveyors Systems*).

3.1. Sistemas alternos de extracción de mineral en operaciones subterráneas

A continuación se presenta una breve descripción de los sistemas alternos² de extracción de mineral hacia la superficie a partir de las operaciones subterráneas, ya que con el creciente avance de la tecnología, las posibilidades de extracción se diversifican:

- Manteo de mineral por medio de banda vertical, contando para ello con dos opciones:
 - a) Banda HAC (*High Angle Conveyor*) tipo *Sandwich*, de la empresa *Continental Conveyors Systems*, que se emplea con mayor frecuencia en tajos abiertos.
 - b) Banda HAC tipo *Cangilones Flexoturn* de *Lake Shore Inc.* Actualmente operando en la mina subterránea *Porgera*, ubicada en Papúa, Nueva Guinea.
- Estos sistemas son utilizados para transportar arriba de las 250 tph, presentando como principales ventajas su relativo bajo consumo de energía y su flexibilidad para ser desmontadas y reinstaladas en caso necesario.
- Extracción por rampa empleando una banda convencional. Este sistema presenta poca complejidad técnica, pero requiere de una obra especial, las inclinaciones en las que se dispone la banda para la extracción son del orden del 23% en función del ángulo de reposo del mineral con longitudes superiores a los 200 metros.
 - Extracción con molienda primaria en el interior de la mina (*Hydraulic Hoisting*). Para este sistema pueden presentarse 2 alternativas:
 - a) Trituración primaria y molienda autógena o semiautógena en el interior de la mina con posterior bombeo a superficie; o
 - b) Trituración primaria y secundaria con molienda primaria en el interior de la mina, con bombeo de pulpa a superficie³.

Se deduce fácilmente que con la molienda autógena realizándose en el interior de la mina, podrían eliminarse los sistemas de manteo y acarreo de mineral, dado que la pulpa producto de esta molienda se bombearía directamente a la planta concentradora ubicada

² Alternos respecto a la extracción tradicional, es decir al manteo por tiro y a la extracción por camión

³ El manejo de sólidos en forma de pulpa por tubería, en una granulometría del orden de las 20 mallas, requiere altas velocidades de conducción para evitar asentamientos de partículas, con el consecuente incremento en la cabeza

en la superficie. Una ventaja más que se vislumbra con este método consiste en el aprovechamiento directo del agua de la mina para el proceso en caso de tenerla, reduciendo la inversión concerniente a las estaciones de bombeo.

Por otra parte, se presentan algunas desventajas como el diseño del molino autógeno, que requiere de periodos relativamente largos de pruebas piloto (del orden de los seis meses) aunado a un posterior periodo de adaptación y dominio de los parámetros de operación de este tipo de molinos a nivel industrial puede llegar a los dos años. Debe añadirse a lo anterior las particularidades de la fabricación, traslado y montaje en el interior de la mina de un molino con estas características.

3.1.2. Ventajas y desventajas de los sistemas alternos

Las ventajas que se tienen con los sistemas de extracción por banda transportadora en rampa son las siguientes:

- Mínimos problemas técnicos de ingeniería civil
- Costos bajos de inversión y de consumo energético relativo
- La banda posee la flexibilidad para manejarse en los tramos de longitud y dirección que más convengan en función de la ubicación de las reservas minerales.
- Independencia de la rampa de servicios para llevarla a donde mejor convenga, y no necesariamente supeditada al objetivo de construir un tiro
- La rampa para la banda transportadora permite posiciones convenientes para barrenación de exploración, lo que no sucede con el tiro

Por otra parte y como cualquier otra solución de ingeniería se presentan las siguientes desventajas:

- Situaciones particulares derivadas del control de la operación de estos equipos, tales como el atascamiento en chutes o la rotura de bandas por materiales de anclaje.
- El manejo de personal, materiales y equipo sobre llantas deberá hacerse por la rampa de servicio con equipos de uso general

3.1.3. Ventajas y desventajas en el sistema de manto convencional (ver figura 1)

Las ventajas que se tienen con los sistemas de extracción por manto convencional son las siguientes:

- Manejo de personal y equipo por el mismo tiro, aunque esta característica está supeditada a las capacidades y dimensiones físicas de la calesa.
- Es posible efectuar el transporte por rampa, con equipo sobre llanta.
- Bajo consumo de energía de los malacates de fricción
- Eficiencia en la operación por ser un proceso continuo.

Desventajas de los sistemas de extracción por manto convencional:

- Una alta inversión inicial en el colado del tiro e infraestructura del mismo la cual no es recuperable ⁴.
- Mayor complejidad y dificultad técnica en su construcción y tiempos de realización
- Una vez instalada la primera etapa del sistema de manto, no hay posibilidad de cambio de ubicación en función del comportamiento de las reservas a mayor profundidad⁵
- Mayor volumen de excavaciones y manejo de materiales durante su construcción aunado a un programa de mantenimiento riguroso

⁴ SAPSA Torreón, 2012, El costo del Tiro Milpillal de la Unidad del mismo nombre ascendió a

⁵ En el caso de la Unidad Madero resulto improductivo el cambio de ubicación del sistema de manto, teniéndose que continuar con el acarreo con camiones.

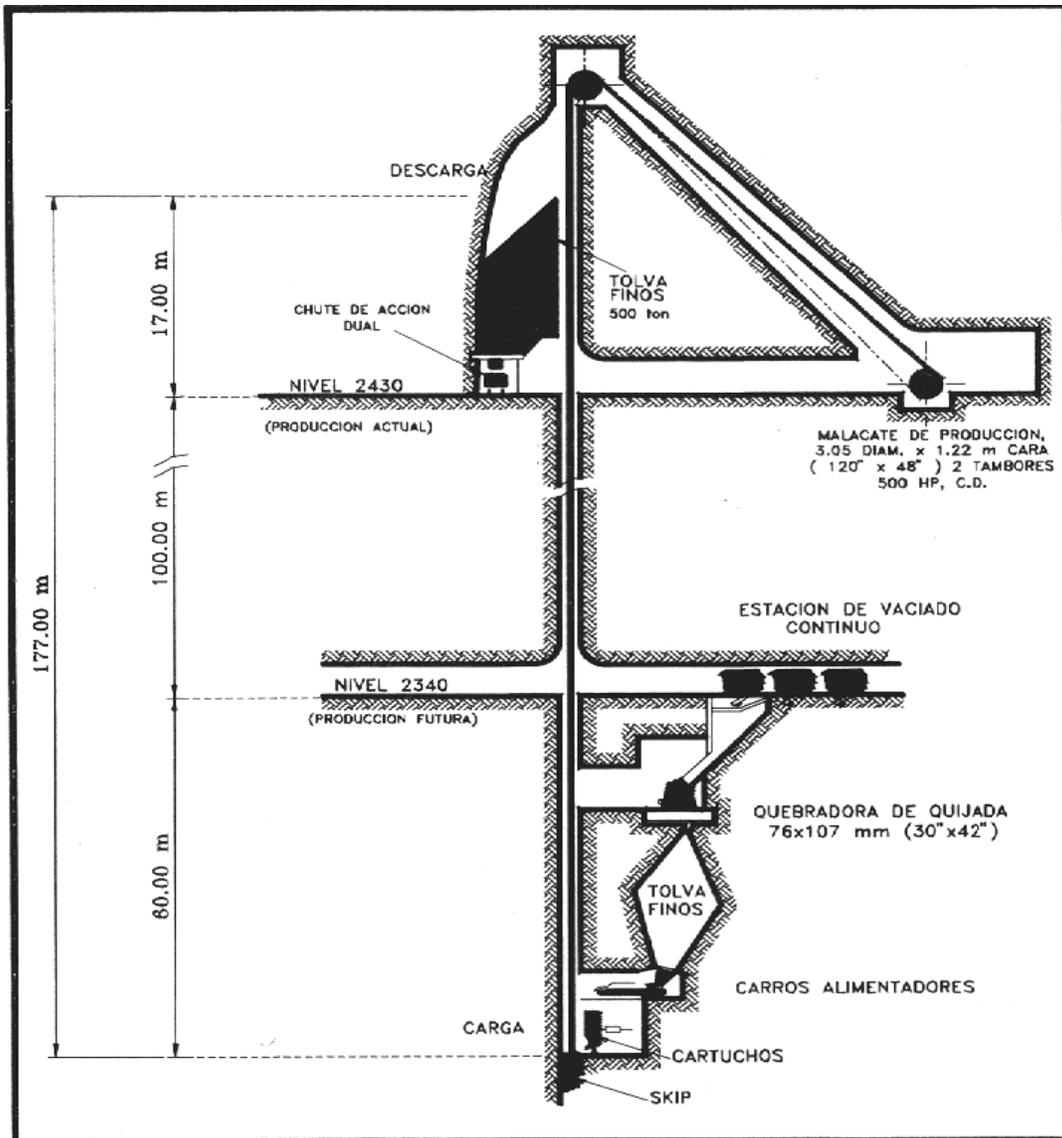


Fig.1 Sistema de manto convencional con tiro y malacate

Fuente: GRAJALES. Fernando "Alternativas al manto convencional en minas subterráneas"

3.1.4. Ventajas y desventajas en el sistema de manto empleando una banda vertical (ver fig. 2.)

Ventajas del sistema de manto empleando banda vertical:

- Su instalación puede realizarse en periodos cortos de tiempo⁶ (de 6 a 8 semanas).
- Bajo costo en consumo energético y alta eficiencia de operación.
- Puede ser instalada en contrapozos Robbins de 2.1 m de diámetro.
- Gran flexibilidad para su desmontaje y traslado a otro sitio de la operación subterránea.
- No requiere de infraestructura de soporte en su tramo longitudinal.

Desventajas del manto con banda vertical:

- Sólo se conocen un par de aplicaciones de este sistema en minería subterránea
- Se trata de sistemas diseñados para manejar una alta capacidad de producción, del orden de las 250 tph a 3,000 o más toneladas por hora.
- Se requieren instalaciones alternas para dar acceso al personal, equipo e insumos.
- Es necesario resolver algunos problemas técnicos que se presentarían con el avance de la explotación del yacimiento, tales como el minado a niveles de producción más profundos que el punto de recepción de la carga o, con producciones simultáneas de diferentes niveles alimentando al mismo sistema de bandas verticales, es decir, es poco flexible
- Costo relativamente alto de la inversión inicial, parcialmente compensado a largo plazo por su bajo consumo de energía y escaso mantenimiento.

⁶ Gerencia Corporativa de Proyectos Mineros, Infraestructura de mina. SAPSA 2012

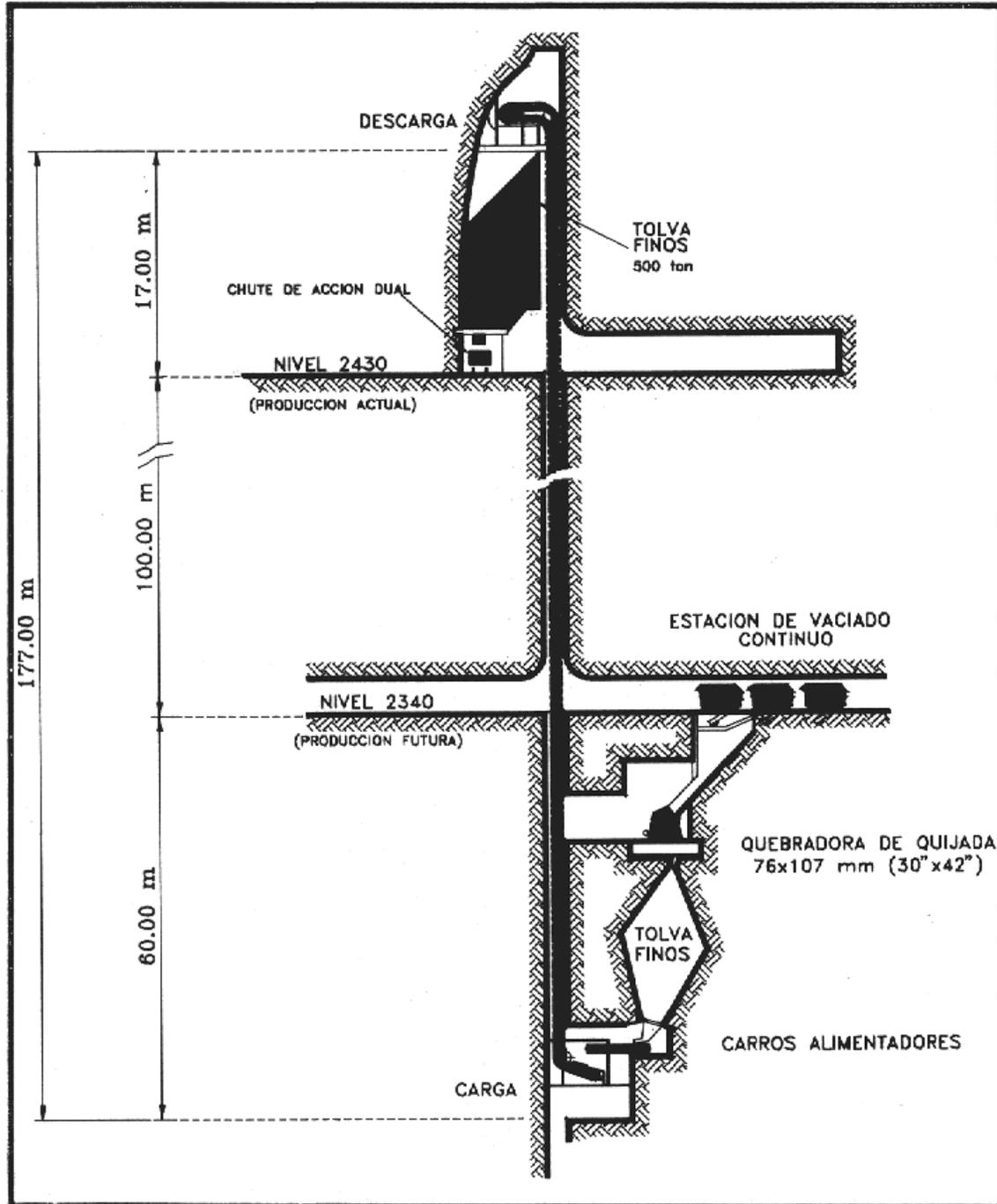


Fig.2 Sistema de extracción por medio de banda transportadora vertical tipo *Sandwich*

Fuente: *Ibíd.*

3.2. Importancia de la disminución del tamaño

La reducción del tamaño en la etapa de trituración tiene como finalidad:

- Obtener partículas del tamaño y forma requeridas para el proceso subsecuente.
- Obtener granulometrías propias para el manto.

En el mercado se cuenta con un abanico de posibilidades respecto del equipo disponible, pero, intrínsecamente, cada equipo tendrá sus restricciones en cuanto a su aplicación. En la industria minera la mayor parte de la reducción de tamaño inicial –trituración- se realiza por medio de esfuerzos de compresión Kelly (1990).

Al realizarse la reducción de tamaño por etapas, el minado es la primera etapa de reducción y ésta se realiza con el uso de los explosivos, la trituración engloba subsecuentes reducciones de tamaño del orden de los 25 mm, estas subdivisiones no son más que las etapas primarias, secundarias y terciarias.

Los equipos empleados para la reducción del tamaño del mineral requieren de características específicas de diseño, las cuales están en función del tamaño final deseado de la partícula; pero en general, logran su cometido de reducción gracias a los esfuerzos de compresión o por impacto.

3.3. Generalidades de la trituración en el interior de la mina

Actualmente la trituración en el interior de la mina es realizada en aquellas operaciones que requieren procesar cantidades superiores a las 400 toneladas por hora. Las ventajas que se tienen al implementar una trituración primaria de este tipo según Hartman (1992) consisten en la reducción de problemas en los cartuchos de manto y/o en las bandas transportadoras a superficie.

Para implementar una estación de trituración subterránea deben tomarse en cuenta ciertas consideraciones técnicas, dado que esta implica la excavación y montaje de la planta en el interior, lo cual es, por demás, técnicamente complejo y costoso⁷. También demanda de un cuidadoso plan económico que proporcione una pronta recuperación de la inversión y márgenes aceptables de

⁷ El costo se ve incrementado por los estudios geomecánicos adicional al costo por soporte de la obra donde se emplazara la trituradora.

ganancias ya que es necesario no sólo incluir aspectos propios al diseño de la planta, sino también del mantenimiento y de seguridad.

3.4. Dimensionamiento de una planta de trituración

El diseño de una estación de trituración primaria subterránea tiene mayores limitaciones que su contraparte en superficie. Sin embargo, la trituración y posterior transportación del mineral hacia la superficie definen la capacidad de la mina, esto es, *las limitaciones de funcionalidad de la trituración, pueden convertirse en las limitaciones finales de producción de la mina.*⁸

3.4.1. Capacidad

En términos generales, la capacidad requerida por la operación define el dimensionamiento y tipo de equipo de trituración a utilizar en la operación minera, así como también el número de trituradoras en paralelo⁹ requeridas para obtener la relación de producción de la operación. En el caso de las plantas de trituración en el interior de la mina, los criterios de selección suelen ser más amplios, pues estos deben garantizar el poder alcanzar la capacidad instalada de la operación con amplios márgenes de seguridad.

Las trituradoras de quijada suelen ser la más común de las soluciones cuando la producción es menor a 1,000 toneladas por hora (tph). Esta cifra está en función del uso o no de cribas vibratorias antes de la trituración (*screening*). Más allá de las 1,000 tph¹⁰, los equipos de trituración primaria giratorias comienzan a mostrarse como una opción por demás interesante. Realmente no hay límites definidos sobre las 2,000 tph, aunque las trituradoras de quijada dispuestas de manera paralela suelen utilizarse en raras excepciones. En general las trituradoras de quijada son claramente las de mayor uso en la industria minera.

La capacidad depende también del tamaño de alimentación así como de las características físicas del material a triturar y la curva de reducción requerida por el proceso. En la mayoría de los casos, la primera etapa de reducción, es decir la trituración primaria, tiene dos claras funciones:

- Proveer material lo suficientemente reducido para ser transportado a superficie, acrecentando la eficiencia en el manto o el acarreo según sea el caso; y

⁸ JAAKONMÄKI, Ari. *Underground Primary Crusher Plant Design*

⁹ *Ibíd.*

¹⁰ *Ibíd.*

- Obtener una adecuada curva de disminución del mineral para la siguiente etapa del proceso.

En cualquier caso, típicamente, el tamaño mayor de la roca triturada fluctúa¹¹ en un rango de 300 a 350mm, lo cual es un tamaño correcto para el transporte por medio de banda a superficie y tal tamaño es adecuado para la etapa secundaria de trituración sin ocasionar contratiempos en el proceso.

Existen operaciones subterráneas en las cuales no sólo la trituración primaria tiene lugar en el interior, sino también las etapas subsecuentes de reducción de tamaño, pero estos casos excepcionales son soslayados por el relativo bajo costo y gran flexibilidad de disponer de la construcción en superficie, lo que deriva en el hecho de que sólo sea la trituración primaria la que tome lugar en el interior de la mina cuando esta sea conveniente.

La mayoría de los métodos de minado subterráneo generan una carga de tamaño más fina que una típica operación a tajo abierto, resultando lo anterior en una mayor capacidad instalada de procesamiento a través de la planta de beneficio. Sin embargo, debe contarse en ciertos casos con métodos alternos para manejar el sobre tamaño de la carga que se alimenta a la trituración. A continuación se describen algunas generalidades para el manejo de dichos excedentes en el tamaño de alimentación.

3.5. Clasificación y manejo del sobretamaño en la trituración en el interior de la mina

Sobre el hecho de clasificar o no el sobretamaño en la trituración se ha discutido con frecuencia¹², pero en lo que a la trituración primaria concierne, la clasificación previa es recomendada cuando se emplean trituradoras de quijada. El caso contrario se presenta al utilizar trituradoras giratorias, las cuales son capaces de procesar una gama más amplia de tamaños en la alimentación, debido a las diferencias técnicas de construcción y funcionamiento de ambos tipos de trituradoras.

¹¹ JAAKONMÄKI, Ari. *Underground Primary Crusher Plant Design*

¹² Ibid

La clasificación de tamaño previa a la trituración es recomendada con equipo de quijada por los siguientes aspectos¹³:

- La capacidad se incrementa cuando el material alimentado se clasifica previamente; de igual forma la energía consumida es menor. En las Figuras 3a y 3b se muestra una simulación en la cual la capacidad de la planta se reduce en un 40% si la clasificación de tamaño es removida, en el primer caso -Ver fig. 3a – se tiene una alimentación de 1000 t/h al proceso, las cuales se clasifican en una parrilla VF866-2V Nordberg con apertura de 160 mm, resultado de la clasificación 516 toneladas pasan a la trituradora C-160 Nordberg con apertura de 220 mm cuya capacidad volumétrica es ocupada en un 69%¹⁴, mientras que 484 toneladas clasificadas pasan al proceso siguiente. En el segundo caso –Ver fig 3b – no se realiza la clasificación, por lo cual ingresan 520 t/h a la trituradora de las mismas características y capacidad volumétrica -69%- al no contar con la clasificación se reduce un 40% el tonelaje procesado en una hora. La trituradora reduce el mineral desde 500 mm a 200mm.
- La vida operativa de las partes de desgaste se incrementa. En una trituradora de quijada se tiene un mayor desgaste en el acero al manganeso por tonelada procesada respecto de una trituradora de cono; esto debido a la cinemática de operación de la misma¹⁵. En una trituradora de quijada el movimiento es excéntrico y las partículas crean un patrón de desgaste mayor.
- Alimentado partículas finas directamente a la trituradora se incrementa la posibilidad de que la carga se atasque (en la jerga minera se utiliza el verbo “apelmazar”). Esta posibilidad se ve reforzada si la carga está húmeda, lo cual es bastante común en las operaciones mineras subterráneas.

¹³ Ibid.

¹⁴ La cual no debe excederse de dicho porcentaje para evitar atragantamiento en la trituradora.

¹⁵ El material triturado se va acumulando en la parte inferior acelerando el desgaste de la lana móvil

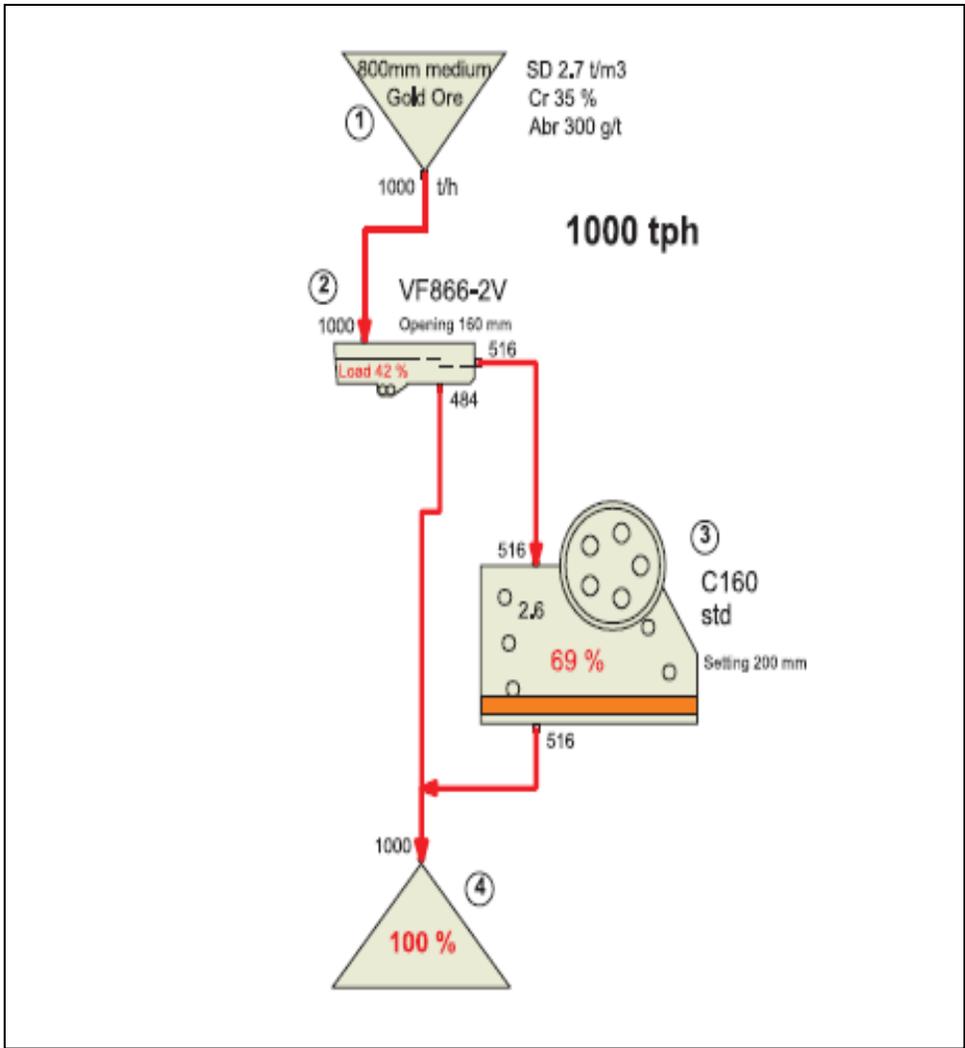


Fig.3.a. Simulación de las capacidades en el proceso de trituración, en el primer caso se cuenta con la clasificación de la partícula previa a la trituración. **Fuente:** *Metso Minerals*

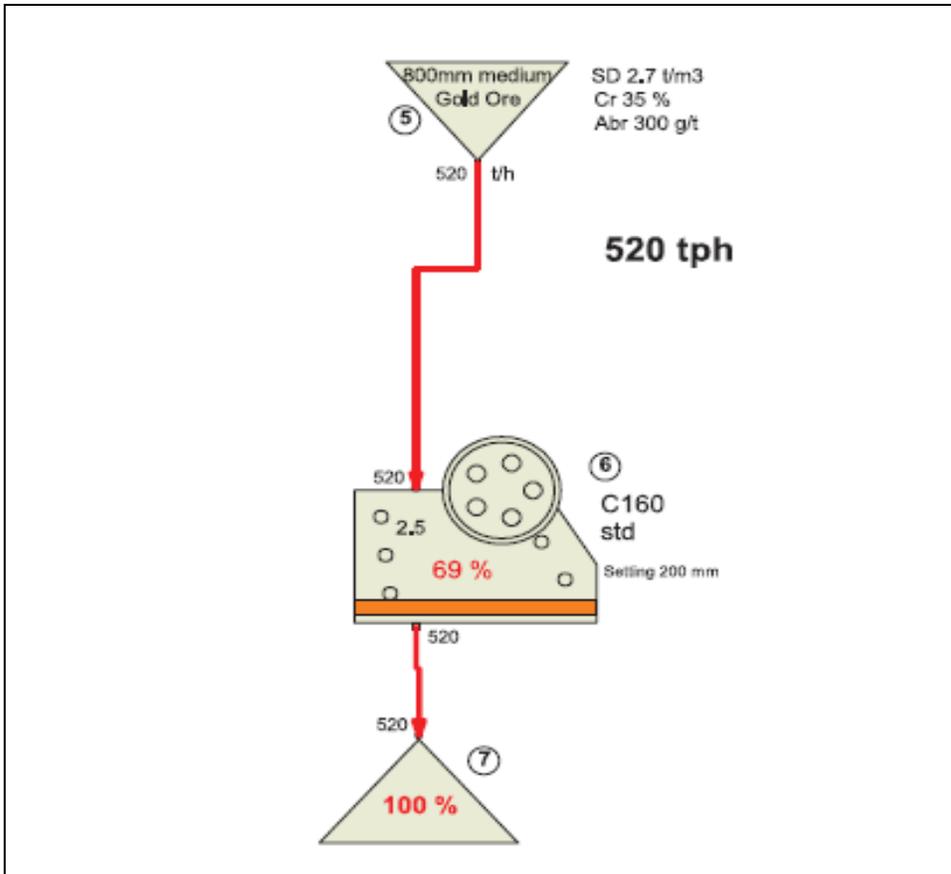


Fig.3.b. Simulación sin clasificación de sobretamaño, en este caso el clasificador ha sido removido

Fuente: *Metso Minerals*

3.5.1. Puntos en contra de la clasificación de tamaño previa a la tritución

La clasificación de la carga por tamaños presenta las siguientes desventajas:

- Si se separa por medio de un clasificador de parrilla vibratoria, de tal forma que se introduce un nuevo elemento al equipamiento existente, debe entonces considerarse el costo de capital y el costo requerido de mantenimiento. La instalación también requiere de *chutes* y demás arreglos que deberán considerarse en función del espacio disponible y del diseño original.
- Una razón común en contra de la instalación de un clasificador resulta del hecho de que, en la minería subterránea, la carga no se encuentra *limpia* de objetos extraños a diferencia

de las operaciones mineras en superficie. Dicha carga incluye desechos tales como anclas, cables, partes de tuberías etc. lo cual puede ocasionar que el clasificador se atasque.

- Si la planta de trituración está planeada para ser operada remotamente y lo más automatizada que sea posible, los desechos pueden causar una obstrucción impredecible del clasificador por lo que, conseguir a alguien que libere y limpie los desechos toma tiempo, lo que deriva en paros en el proceso, menor capacidad a largo tiempo y menor rentabilidad¹⁶.
- En la práctica, el tratar con cuestiones tales como los desechos y la ocasional alimentación de partículas con sobretamaño puede resolverse, o evitarse, al seleccionar una trituradora que esté claramente por encima de la necesidad teórica de tamaño, y por lo tanto, menos sensible a las variaciones del proceso.

La decisión de llevar a cabo o no la clasificación previa es una cuestión propia de la trituración primaria con equipo de quijada. Una trituradora de cono no es tan sensible a las partículas finas pues estas fluyen más fácilmente a través de la trituradora.

3.6. Instalación de maquinaria y disposición de la trituradora primaria en el interior

La planta de trituración primaria en el interior de la mina es comúnmente construida en su parte más profunda y, en función del comportamiento esperado de las reservas minables del yacimiento. La parte más difícil de manejar en la instalación es la propia trituradora, mientras que los alimentadores y las cribas son más fáciles de maniobrar por su peso y tamaño.

En años recientes, la construcción modular – véase la Fig. 4 – vino a representar un gran avance para este tipo de operaciones, ya que algunas trituradoras primarias de quijada son ya construidas por este método; el caso contrario sucede con las trituradoras de cono, dado que incluso si fueran en su totalidad construidas por módulos, estos serían por demás voluminosos, *vr. gr* la carcasa superior de una quebradora giratoria de 54 pulgadas pesa entre 60 y 70 toneladas por lo que el izar tal peso en una maniobra subterránea se vuelve una cuestión a considerar, lo que inclina la elección hacia la trituradora de quijada como la ideal para la instalación en el interior de la mina.

En relación con lo anterior, la parte más pesada de una trituradora es del orden de las 40 toneladas y requiere un espacio vertical libre de 5 metros para ser izada, en este sentido los

¹⁶ Situación que se minimiza con la adecuada instalación de un electroimán que retenga la mayor cantidad de desechos antes de la clasificación

equipos de izado como las grúas viajeras son los más comúnmente utilizados en las plantas de trituración y se han mostrado eficientes en los trabajos de mantenimiento.

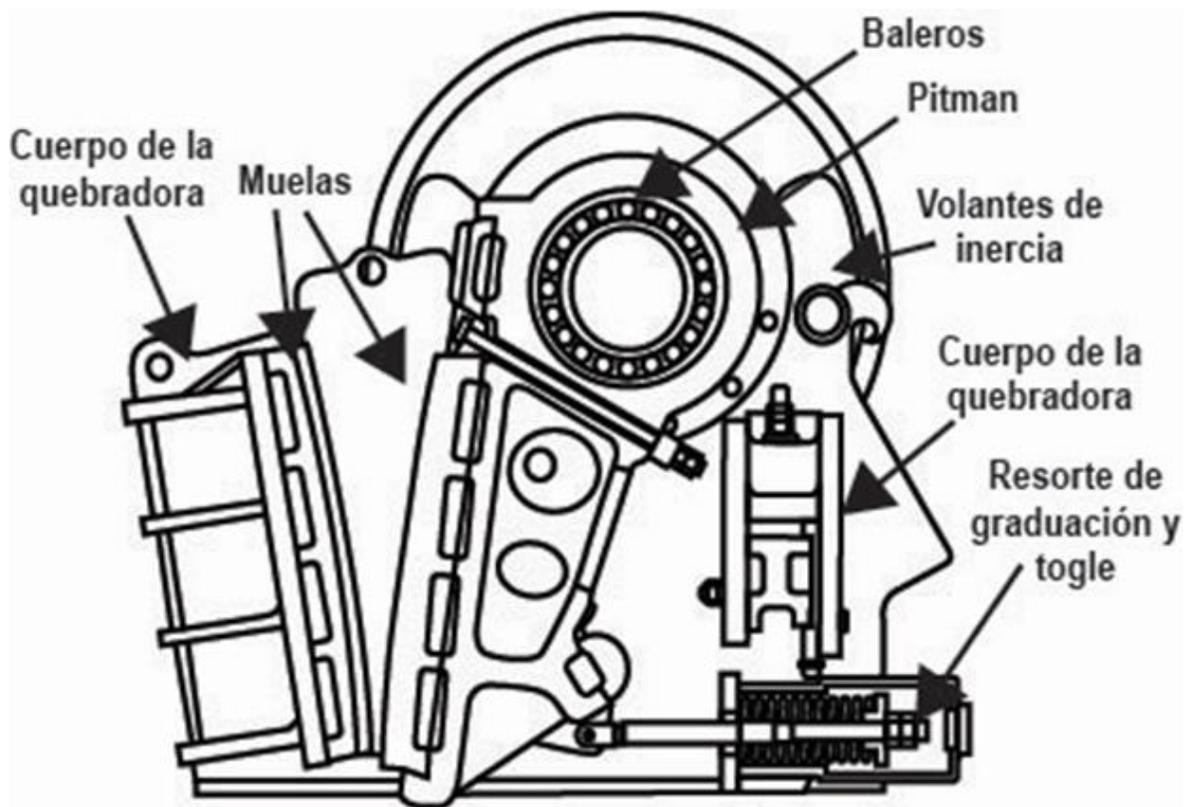


Fig. 4. Partes principales de una trituradora de construcción modular . **Fuente:** SAPSA 2012

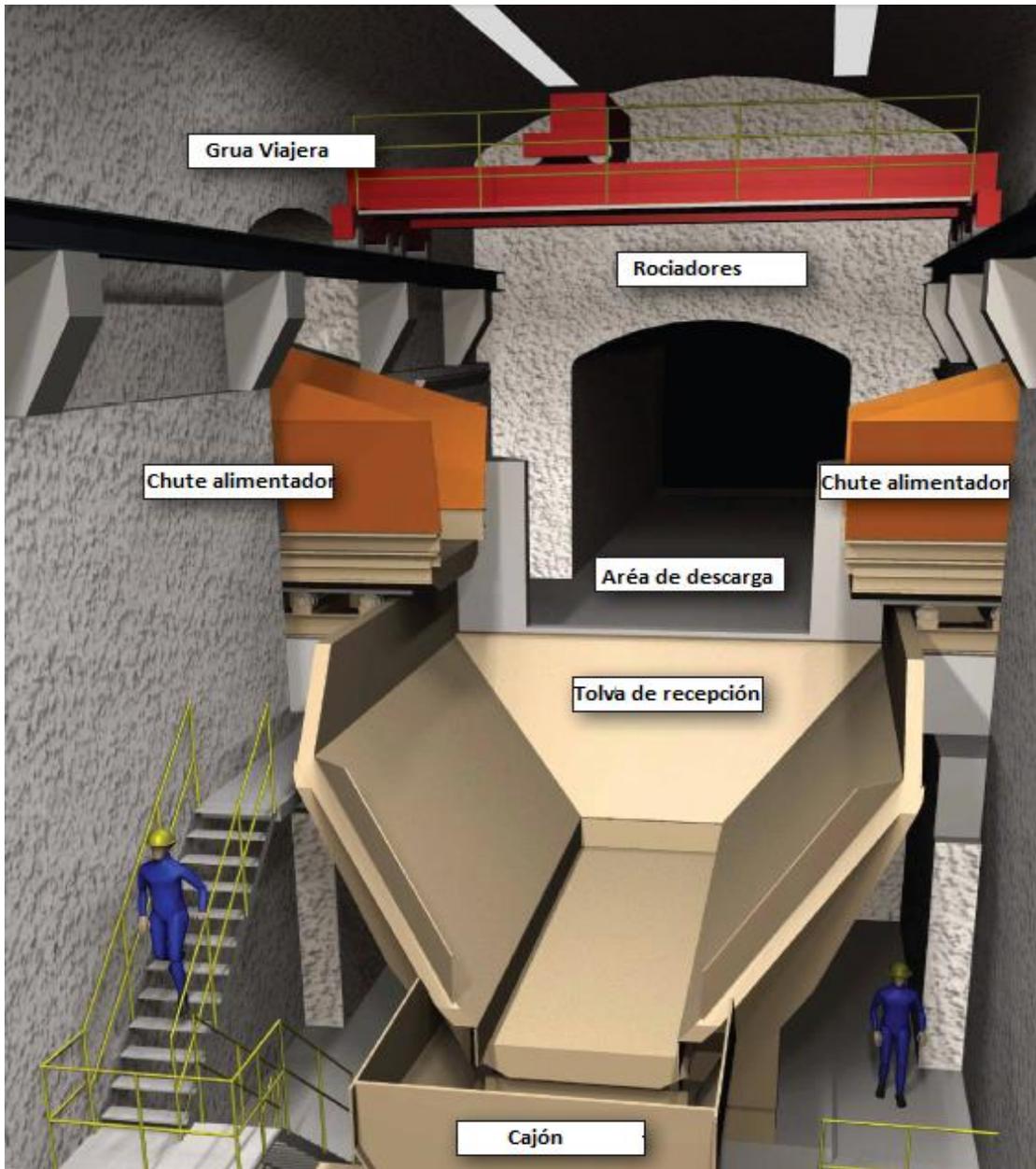


Fig. 4.1. Disposición de la estación subterránea de trituración en la Mina *Pyhäsalmi*¹⁷. La planta está totalmente automatizada y es operada desde un cuarto de control en superficie, a 1.4 km sobre la trituradora de quijadas.

Fuente: *Metso Minerals*.

¹⁷ Ubicada en Finlandia, es la mina metálica más profunda de Europa.

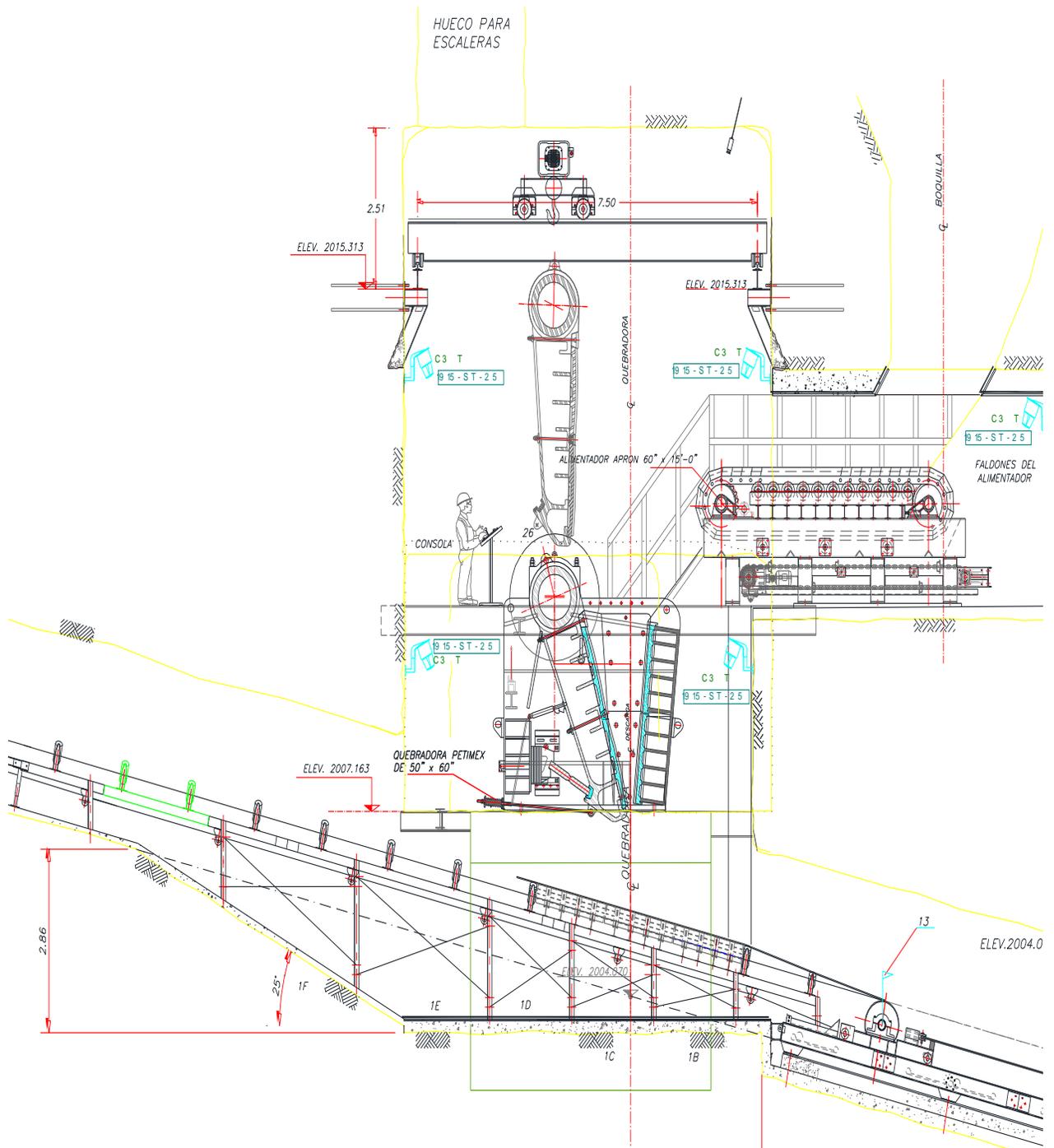


Fig. 4.2. Disposición de la trituradora en interior en Minera Madero. **Fuente:** *Evaluación Económica del Proyecto Francisco I. Madero (1999)*

IV. DESARROLLO

4.1. Metodología

La metodología empleada en el presente documento se enmarca en los siguientes tipos de investigación: bibliográfica y de campo:

- Bibliográfica: Se sustentó la base teórica de la investigación, mediante consultas a fuentes bibliográficas, textos y revistas así como también en fuentes multimedia e Internet (mesográficas)
- De campo: Se presentó la información recabada en unidades mineras y la experiencia que estas han tenido con la ubicación de esta etapa de trituración. En un caso, esta se realiza en la superficie mientras que en el segundo caso, esta tiene lugar en el interior de la mina.

En el presente documento se emplea el método deductivo. Tal como se señaló en la introducción; se parte de un enfoque general cuyo propósito consiste en servir de fundamento para la aplicación del resultado de manera particular, esto es, deducir el grado de certeza a partir de la conclusión propuesta.

En cuanto a la evaluación económica, se emplean los criterios de evaluación más comunes para este tipo de estudios, criterios que se describen en el capítulo correspondiente

Se considera el caso hipotético en el cual se evaluara la conveniencia de triturar en el interior de la mina o hacerlo de la manera *tradicional*, es decir en la planta de beneficio ubicada en superficie y dispuesta estratégicamente, se considera un yacimiento con 8, 400,000 toneladas de mineral probadas, con una ley de 250 gramos de plata. La ubicación del denunciado minero es en un área de acceso relativamente fácil, cuenta con agua para el proceso y se asume que el proceso de concentración es por medio de flotación con una recuperación de valores del 89%.

Se considera una planta con capacidad de 4,000 toneladas por día con una vida operativa de 6.5 años.

En el caso propuesto, se mantiene fija la variable distancia, se analiza el caso con distancias verticales similares de manto, con la finalidad de comparar escenarios *equivalentes* en las que el proceso de trituración sea la única variable dentro del factor de decisión económico.

4.2. Reglas Generales¹⁸ (*Rules of thumb*)

- En terrenos con capas de aluvión, es altamente recomendable emplazar la trituradora en el interior.
- Si se manta por tiro o se extrae por banda se vuelve obligado el triturar en el interior, lo anterior por el manejo de la carga en los botes de manto¹⁹.
- El tamaño máximo de alimentación a la quebradora, deberá ser del 80% de su capacidad
- El acarreo con camión convencional, se vuelve incosteable más allá de los 6 kilómetros
- Las bandas para extracción tendrán una pendiente de 20 a 23%
- Para el manto es preferible contar con malacates de tambor sobre los de fricción, el cambio de cables del segundo toma por lo menos un mes.
- El tamaño de la roca se reduce un 55% triturando en el interior de la mina.
- Si el mineral en el yacimiento se encuentra concentrado en un área bien definida, es factible el instalar la trituración en interior para su posterior manto.
- Un tiro es más eficiente y productivo que extracción por banda inclinada, su gran inconveniente es su costo de construcción y tiempo empleado en ello
- Toma en promedio 5 años colar un tiro (600 metros, 4.40 metros de diámetro).
- El costo por metro de tiro colado se encuentra, como regla general entre los 15,000 a 17,000 dólares.
- La tendencia apunta a la implementación de la trituración en interior en las operaciones mineras, y de ser posible la molienda.
- Antes de optar por el *colado* de un tiro, es preferible revisar la eficiencia en el acarreo por camiones.

¹⁸ Fuente: Gerencia Corporativa de Proyectos Mineros, Infraestructura de mina. SAPSA 2012

¹⁹ Esta regla empírica proporciona la respuesta a la hipótesis planteada, la cual se ha presentado hasta este punto del presente trabajo por no contarse con el sustento teórico

4.3. Consideraciones generales de la evaluación económica

Si bien las variables que se presentan en una evaluación económica de este tipo son válidas para grandes y pequeñas operaciones mineras, el tamaño, que está en función del tipo de yacimiento y del tonelaje beneficiado al año, en una operación minera subterránea pequeña²⁰ se encuentra entre 30,000 a 144,000 toneladas anuales.

Entonces, para determinar el tamaño de una planta de beneficio es necesario considerar los aspectos generales mostrados en la siguiente tabla:

Tabla 1. Aspectos generales para determinar el tamaño de una planta de beneficio. *MORALES, Arturo M. (1983)*

Mina	Planta	Operaciones Auxiliares	Mercado
Reservas	Inversión	Inversión	Cotización del mineral
Ley	Tipo de beneficio	Costo de mantenimiento	Impuestos
Costo de minado	Ubicación de la trituración primaria		Valor presente
Método de minado			

En épocas pasadas se ha considerado como una regla general el no agotar los depósitos pequeños en menos de seis años por razones tales como la inversión en la infraestructura, escuelas, caminos y un factor que se torna más relevante en estos días, el impacto social que generaría el cierre de la mina²¹.

Para calcular el tamaño óptimo de la producción anual, debe contarse con información confiable sobre el yacimiento. En el caso propuesto, se asume que se cuenta con datos confiables y suficientes para la determinación de las reservas minables, tipo de minado, pruebas de concentración y la recuperación, así como grado de concentrado que se puede esperar de la planta de beneficio.

²⁰ Se considera pequeño o mediano minero a quien, respectivamente, satisfaga cualquiera de las características siguientes: - *Art.9 del Reglamento de la Ley Minera-*

I.- Obtenga ingresos brutos por ventas anuales de minerales o sustancias sujetos a la aplicación de la Ley inferiores a cinco mil o veinte mil veces el salario mínimo general vigente en el Distrito Federal elevado al año.

II.- Extraiga mensualmente hasta tres mil o doce mil toneladas de mineral, o

III.- Aporte hasta el 1.0 o 4.0% de la producción nacional anual del mineral o sustancia de que se trate. *Art.9 del Reglamento de la Ley Minera*

²¹ Arturo M. (1983) "Como determinar el tamaño de una planta de beneficio" Revista Geomimet. México. DF

Adicionalmente, deben considerarse los siguientes aspectos:

- Transportación del mineral
- Disposición del tepetate
- Disposición del jal

En lo que se refiere a operaciones auxiliares al minado se tienen los siguientes:

- Caminos
- Agua para la operación de beneficio
- Planta de fuerza
- Infraestructura de almacenamiento y mantenimiento
- Oficinas
- Campamento

Para obtener la estimación de la producción óptima, se debe tener, en primer lugar, la inversión requerida y los costos de operación para las diferentes propuestas de tamaños de la planta de beneficio.

Posteriormente, debe considerarse el valor del concentrado en el mercado para la unidad minera en cuestión, para ello es sensato asumir tres precios para el mineral, esto es el bajo, intermedio y el precio alto; para tal determinación se consideran los siguientes factores:

- Porcentaje de recuperación
- Costos y castigos de la planta de fundición
- Manejo y fletes del concentrado y seguros
- Costo de venta del concentrado
- Impuestos

Los aspectos mencionados se contextualizan en el siguiente caso hipotético:

En un estado de la República Mexicana se pretende evaluar la conveniencia de triturar en el interior de la mina o hacerlo de la manera tradicional, es decir en la planta de beneficio ubicada en superficie y dispuesta estratégicamente.

El yacimiento en cuestión cuenta con 8, 400,000 toneladas de mineral probadas, con una ley de 250 gramos de plata. La ubicación del denuncia minero es en un área de acceso relativamente fácil, cuenta con agua para el proceso. Se asume que el proceso de concentración es por medio de flotación con una recuperación de valores del 89%.

Para este yacimiento se considera una planta con capacidad de 4,000 toneladas por día, para ello se cuenta con los siguientes datos para tales condiciones²²

Toneladas por día	4,000
Vida operativa de la unidad (años)	6.5

Jornadas laborales: 320 días por año, 24 horas por día con un 85% de disponibilidad

²² Los costos aquí presentados son determinados con base en los costos de las minas de Grupo Peñoles, los datos comparativos provienen de la Unidad Tizapa, Milpillás y Madero. Los costos se presentan en dólares.

V. ESTUDIO DE CASO Y ANÁLISIS DE DATOS

5.1. Estimación de costos y análisis financiero

Con base en las especificaciones presentadas en el capítulo anterior, se presentan dos alternativas económicas. En la primera, (caso A) se analizan los costos de la operación minera efectuando la trituración del mineral en superficie; mientras que en la segunda, (caso B) tiene lugar en el interior de la mina. Dichas comparaciones tienen la finalidad de determinar el impacto de la trituración como variable de decisión.

5.2. Costo de operación por tiro

Para el cálculo de costo de operación por medio de un tiro de extracción y triturando en el interior de la mina, se utilizaron como referencia las operaciones actuales de Peñoles que tiene con este tipo de proceso²³.

Tabla 2. Costos de operación por concepto de manto correspondientes al 2012, (diciembre 2012)

	Pesos (real)	USD	toneladas	Dólares/ton
Naica	3,963,275	304,867	380,947	0.80
Fresnillo	18,529,207	1,425,324	1,362,720	1.05
Ciénega	10,554,819	811,909	531,271	1.53
Total	33,047,301	2,542,100	2,274,938	1.12

Dentro de los costos de operación empleando un tiro como medio de manto, se consideran los costos de acarreo horizontal al ser esta una operación necesaria para llevar el mineral desde los rebajes de producción hasta el punto de cargado en el tiro.²⁴

Por otro lado, empleando este sistema de extracción y con la salvedad de triturar en superficie se tienen los siguientes costos de operación²⁵

²³ Información presentada con la anuencia de la División Minas, Peñoles

²⁴ En los costos se consideran los costos de acarreo horizontal, mismos que fueron evaluados y presentados en conjunto con los costos de manto. SAPSA 2012, *Proyecto Tiro Tizapa*

²⁵ Tomando como base los resultados del estudio económico del *Tiro Tizapa* en el cual el resultado de 1.24 dólares/ton considera manto el mineral para posteriormente triturarlo en la superficie.

Toneladas de manto	8'400,000 ton
Costo de manto	1.24 usd/ton

Cotización Promedio de la onza de Plata: 41.4 US dls/oz
Paridad Dólar – Peso (12.3724 pesos/dólar)

5.2.1. Costos e inversión

La inversión requerida para las dos alternativas, estimada en orden de magnitud, es como sigue:

Para los casos presentados se tiene:

Tabla 3. Inversión Inicial, rubro: mina.

MINA	Caso A (superficie)	Caso B (interior)
Desarrollos	\$3'907,019.79	\$4'688,423.74 ²⁶
Servicios Mina	\$152,424.45	\$152,424.45
Equipo Mina	\$628,750.87	\$628,750.87
Operaciones Auxiliares	\$121,939.56	\$121,939.56
Total Mina	\$4'810,134.67	\$5'591,583.63

Los costos mostrados anteriormente incluyen las obras de desarrollo tales como, las tolvas de las metaleras, los sistemas de bombeo, los cargaderos para camiones²⁷ y los contrapozos de servicios por citar los más relevantes.

²⁶ Para el caso en el cual se tritura en interior, se considera, por lo general un aumento del 20% en los costos de desarrollo respecto del caso tradicional, lo anterior obedece al hecho de acondicionar el lugar para la instalación de la trituradora en el interior para su correcto funcionamiento. Se presentan los costos de inversión finales, los aspectos considerados son los mismos para el caso A y el caso B, con el incremento en el segundo caso por los desarrollos mencionados líneas atrás. **Fuente:** *Gerencia Corporativa de Proyectos Mineros, Infraestructura de mina. SAPSA 2012*

²⁷ Los cuales son empleados para el acarreo el horizontal, hasta el punto del tiro, costo que se refleja en el rubro desarrollo.

Tabla 3.1. Inversión Inicial, rubro: beneficio

BENEFICIO	Caso A	Caso B
Trituración	\$801,562.09	\$641,249.67 ²⁸
Molienda	\$768,790.83	\$768,790.83
Flotación	\$1,194,055.06	\$1,194,055.06
Filtrado y espesamiento	\$224,063.95	\$224,063.95
Colas	\$212,632.11	\$212,632.11
TOTAL	\$3'201,104.04	\$3'040,791.62

5.3. Inversión inicial

Para los casos presentados se tiene:

$$I_A = \$4'810,134.67 + \$3'201,104.04 = \mathbf{\$8'011,238.71}$$

Inversión en dólares por tonelada (\$2,002.81/ton)

$$I_B = \$5'591,538.63 + \$3'040,791.62 = \mathbf{\$8'632,330.25}$$

Inversión en dólares por tonelada (\$2,158.08/ton)

5.4. Costos directos

Tabla 4. Centro de costos (Mina)

Mina	Caso A	Caso B
Minado ²⁹ (Rebajes)	\$3.43	\$3.43
Manteo	\$1.24	\$1.12
LHD	\$5.09	\$5.09
Generales ³⁰	\$1.49	\$1.19
Ventilación y aire	\$0.95	\$0.95

²⁸ La inversión en el rubro de trituración se reduce un 20% respecto del caso de triturar en superficie. Lo anterior obedece a los costos manejados por el contratista para este tipo de instalaciones.

²⁹ Los costos de minado incluyen los referentes al explosivo y demás insumos, en ambos casos es el mismo costo por la estandarización de la plantilla de barrenación, en terrenos con ciertas particularidades esta se podrá abrir o cerrar, pero para fines de evaluación se considera la misma para ambos casos.

³⁰ La disminución de los costos generales obedece a los asociados al mantenimiento, en el Caso B es menor por el hecho de omitirse la trituración secundaria, ya que se procesa el producto de la trituradora directamente a un molino SAG, y si bien en el primer caso el proceso es similar, el mantenimiento al equipo de manteo incide en los costos, al ser mayor este respecto del caso B.

Agua	\$0.19	\$0.19
Desarrollo	\$6.67	\$8.15
Total mina	\$19.05	\$20.12

Tabla 4.1. Centro de costos (beneficio)

Beneficio	Caso A	Caso B
Trituración	\$0.53	\$0.43
Molienda	\$4.76	\$4.10 ³¹
Flotación	\$4.88	\$4.25
Espesamiento y Filtrado	\$1.56	\$1.56
Manejo de jal	\$0.55	\$0.55
Agua y otros	\$2.46	\$2.46
Total beneficio	\$14.75	\$13.35

Tabla 4.2. Resumen de costos³²

Costo Beneficio	\$14.75	\$13.35
Costo de minado	\$19.05	\$20.12
Costo total directo	\$33.80	\$33.47
Costo directo	\$43'264,156.69	\$42'843,576.34

5.5. Valor de concentrado

Para ambos casos se tiene lo siguiente:

Tonelaje	Ley (g/ton)	Contenido (kg)	Cantidad Recuperada (89%)	Concentrado (kg/ton)	Toneladas de concentrado
120,000	250	30,000	26,700	16.36	1632.0293

Para determinar el valor de una tonelada de concentrado, se tiene, para ambos casos:

³¹ La molienda disminuye en el caso B por el hecho de existir una mayor eficiencia energética por recibir el molino una granulometría de entrada de 5 pulgadas, contra la entrada de 9" al realizarse la trituración en superficie.

³² Para efectos de cálculo se toman 4 decimales, pero solo se presentan dos decimales en el presente trabajo.

$$\text{Valor Ton. Concentrado} = \frac{(16.36 \text{ kg/ton}) \times (41.4 \text{ dólares/oz})}{0.031104} \times (90\%) = \$19,597.92$$

5.6. Deducciones

Tabla 5. Centro de costos (deducciones)

Fundición, manejo y flete	\$6,500
Ensayes y castigos	\$3,500
Apoyo comunitario	0.32
Exploración	0.09
Valor de la tonelada	\$5,939.19
Por producción diaria	80.7744 dólares/ton

5.7. Estado de resultados

Para los casos analizados, se tienen los siguientes estados de resultados

Caso A:

Tabla 6. Estado de resultados Caso A

Producción Anual	1'280,000
Vida operativa	6.5
Utilidad Anual Bruta	\$103'391,292.75
Deducciones	
Costo directo	\$43'264,156.69
Costo Indirecto ³³	\$25'959,144.95
Depreciación ³⁴	\$11'405,945.77
Utilidad Gravable ISR	0.32
PUT (Incluido en indirectos)	10%
Utilidad Neta Anual	\$15'478,190.83

³³ Los costos directos para el presente análisis corresponden al 60% de los costos directos. **Fuente:** MORALES, Arturo M. (1983) "Cómo determinar el tamaño de una planta de beneficio"

³⁴ En el caso de la depreciación y para ambos casos el valor corresponde al 43% de los costos indirectos. *Ibíd.*

Caso B:**Tabla 6.1** Estado de resultados Caso B.

Producción Anual	1'280,000
Vida operativa	6.5
Utilidad Anual Bruta	\$103'391,292.75
Deducciones	
Costo directo	\$42'843,576.34
Costo Indirecto	\$25'706,790.41
Depreciación	\$11'295,066.07
Utilidad Gravable ISR	0.32
PUT (Incluido en indirectos)	10%
Utilidad Neta Anual	\$16'011,184.75

*Variables empleadas para el cálculo***Tabla 6.** Variables empleadas para el cálculo

Inflación	0.044
Tasa Bancaria	0.048
<i>i</i>	0.092
TMAR(tasa mínima aceptable de retorno)	0.16928
Premio al riesgo	0.12

VI. EVALUACIÓN DE RESULTADOS

6.1. Evaluación financiera

El estudio de la evaluación financiera es la parte final de toda la secuencia de análisis de factibilidad del proyecto.

En este momento surge la necesidad de definir el método de análisis que se empleará para comprobar la rentabilidad financiera del proyecto. Es sabido que el dinero disminuye su valor real con el paso del tiempo a una tasa aproximadamente igual al nivel de la inflación vigente. Esto implica que el método de análisis empleado deberá tomar en cuenta este cambio real del dinero a través del tiempo.

6.1.2. Criterios de evaluación

Para la evaluación se consideran los siguientes dos criterios:

1. Valor presente neto VPN
2. Tasa interna de retorno TIR

Valor presente neto: es el valor monetario que resulta de restar la suma de los flujos descontados a la inversión inicial; Para los casos bajo análisis se tiene la siguiente tabla de resultados:

6.1.3. Caso A (Trituración en superficie, \$1.24/ton)

Tabla 7. Evaluación económica, caso A

Año	1	2	3	4	5	6	6.5
Producción Anual (Ton)	1,280,000	1,280,000	1,280,000	1,280,000	1,280,000	1,280,000	64,000
Utilidad Anual Bruta	\$103,391,292.75	\$103,391,292.75	\$103,391,292.75	\$103,391,292.75	\$103,391,292.75	\$103,391,292.75	\$103,391,292.75
Deducciones							
Costo Directo	\$43,264,156.69	\$43,264,156.69	\$43,264,156.69	\$43,264,156.69	\$43,264,156.69	\$43,264,156.69	\$21,632,078.35
Costo Indirecto	\$25,959,144.95	\$25,959,144.95	\$25,959,144.95	\$25,959,144.95	\$25,959,144.95	\$25,959,144.95	\$12,979,572.47
Depreciación (acelerada)	\$11,405,945.77	\$11,405,945.77	\$11,405,945.77	\$11,405,945.77	\$11,405,945.77	\$11,405,945.77	\$5,702,972.89
ISR	\$7,283,854.51	\$7,283,854.51	\$7,283,854.51	\$7,283,854.51	\$7,283,854.51	\$7,283,854.51	\$3,641,927.25
Flujo neto de efectivo	\$15,478,190.83	\$15,478,190.83	\$15,478,190.83	\$15,478,190.83	\$15,478,190.83	\$15,478,190.83	\$7,739,095.41
Valor Presente VP	\$14,174,167.42	\$12,980,006.80	\$11,886,453.11	\$10,885,030.32	\$9,967,976.49	\$9,128,183.60	\$4,3676,601.95
Suma	\$73,389,419.69						
VPN	\$65,378,180.98						

6.1.4. Caso B (Trituración en interior mina, \$1.12/ton)

Tabla 7.1. Evaluación económica, caso B

Año	1	2	3	4	5	6	6.5
Producción Anual (Ton)	1,280,000	1,280,000	1,280,000	1,280,000	1,280,000	1,280,000	64,000
Utilidad Anual Bruta	\$103,391,292.75	\$103,391,292.75	\$103,391,292.75	\$103,391,292.75	\$103,391,292.75	\$103,391,292.75	\$103,391,292.75
Deducciones							
Costo Directo	\$43,843,576.34	\$43,843,576.34	\$43,843,576.34	\$43,843,576.34	\$43,843,576.34	\$43,843,576.34	\$21,421,788.17
Costo Indirecto	\$25,706,790.41	\$25,706,790.41	\$25,706,790.41	\$25,706,790.41	\$25,706,790.41	\$25,706,790.41	\$12,853,395.20
Depreciación (acelerada)	\$11,295,066.07	\$11,295,066.07	\$11,295,066.07	\$11,295,066.07	\$11,295,066.07	\$11,295,066.07	\$5,647,533.04
ISR	\$7,534,675.18	\$7,534,675.18	\$7,534,675.18	\$7,534,675.18	\$7,534,675.18	\$7,534,675.18	\$3,767,337.59
Flujo neto	\$16,011,184.75	\$16,011,184.75	\$16,011,184.75	\$16,011,184.75	\$16,011,184.75	\$16,011,184.75	\$8,005,592.38

de efectivo							
Valor Presente VP	\$14,662,257.10	\$13,426,975.36	\$12,295,764.99	\$11,259,858.05	\$10,311,225.32	\$9,442,514.03	\$4,518,001
Suma	\$75,916,595.85						
VPN	\$67,284,265.60						

6.2. Resultados comparativos

Del análisis de las tablas anteriores se obtienen los siguientes resultados comparativos:

- Para ambos casos se tiene un $VPN > 0$
- El flujo neto de efectivo a lo largo de la duración de la explotación en el caso B es mayor respecto de la trituración en superficie (caso A)

$$FNE_A < FNE_B \quad (\$100,608,240.37 < \$104,072,700.88)$$

- La inversión correspondiente al caso B es 8% mayor respecto de triturar en superficie
- A lo largo de la duración del proyecto, y para los casos analizados se tiene una diferencia favorable de \$3,464,460.51, lo cual hace recomendable el triturar en el interior de la mina, ya que permite una recuperación de la inversión mayor respecto de triturar en superficie.
- La eficiencia en el manto es un 10% mayor triturando en el interior de la mina

6.3. Tasa interna de retorno

En ambos casos analizados, la tasa de retorno es e alta, lo anterior tiene su explicación en el hecho en que se toma sólo la inversión para adaptar la trituración en el interior de la mina, ya que se cuenta con capital disponible previo a la modificación, en ambos casos la tasa es mayor a la TMAR, que para el caso es de 16.92%

TIR Caso A 93%

TIR Caso B 85%

El hecho de que la tasa en el caso B es menor, esto es triturando en el interior, obedece a que la inversión es ligeramente mayor -8%- por el emplazamiento e instalación de la trituradora en el nivel de acarreo.

6.4. Modelo matemático

Del análisis puntual de la anterior evaluación financiera se desprende la siguiente formulación matemática³⁵, la cual permite estimar el resultado para situaciones similares donde, partiendo de la previa evaluación de triturar tradicionalmente en superficie -llamémosle caso A-, se conozca la ganancia financiera llevando la etapa mencionada al interior de la mina -llamémosle caso B-, en condiciones similares, a saber:

Para el caso de evaluar el VPN³⁶ de triturar en el interior de la mina, comparado con la opción de triturar en superficie:

$$VPN(B) = -1.08(IA) + \frac{(1.034)FNE(A)}{(1+i)^1} + \frac{(1.034)FNE(A)}{(1+i)^2} + \frac{(1.034)FNE(A)}{(1+i)^3} + \dots + \frac{(1.034)FNE(A)}{(1+i)^n}$$

Donde:

VPN (B)= Valor presente neto, de la opción de triturar en el interior de la mina

I (B) = Inversión inicial de triturar en interior mina

I (B)= **1.08 (IA)**

FNE (B)= Flujo neto de efectivo, triturando en el interior de la mina.

FNE (B)= **1.034 (FNE A)**

Para obtener la TIR (tasa interna de retorno) del caso en el cual se tritura en interior mina -B-, partiendo de la evaluación económica del primer caso -A- se tiene la siguiente aproximación

TIR (B) = 0.91 TIR (A)³⁷

Donde, es evidente que la tasa triturando en interior mina, es menor, por el ligero aumento de la inversión inicial en el mismo caso.

³⁵ Es evidente que cada caso deberá analizarse de manera puntual, con este modelo se pretende facilitar de s la toma de decisiones con base en un sustento ingenieril

³⁶ El valor presente neto, para ambos casos, se da por hecho que es mayor a cero.

³⁷ Tasa que, evidentemente deberá ser mayor a la TMAR

VII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Ambos casos al evaluarse por el VPN y la TIR resultan rentables, el punto a resaltar es cuánto más es uno respecto del otro, ya que manteniendo la opción de triturar en superficie se obtiene un aceptable margen de ganancia, este se ve aumentado con la trituración en el interior de la operación, las ventajas de optar por tal camino ya se han hecho patentes a lo largo de este trabajo, en resumen:

- El costo por extracción triturando el mineral en interior de la mina es de 1.12 dólares/tonelada, contra los 1.24 dólares/tonelada de hacerlo en superficie.
- Se tiene una ganancia extra de 3,464,460.51 dólares por año, emplazando la trituradora en el interior de la operación, lo que representa una utilidad extra de **3.40%** sobre la trituración en superficie
- La inversión de triturar en el interior es 8% mayor respecto del caso A, sin embargo esta diferencia es justificada por el porcentaje de aumento en la utilidad
- La eficiencia en el manto es un 10% mayor triturando en el interior de la mina, lo que se ve reflejado directamente en el costo de extracción, y en los costos de consumo energético, eficiencia que incide en los costos

Por lo anterior es altamente recomendable instalar la etapa de trituración primaria en el interior de la operación minera, y de ser posible ir más allá e instalar la molienda, ya que posiblemente se verán disminuidos los costos de operación.

AGRADECIMIENTOS

Para aquel Ser Superior, en cuya omnisciencia confié mis pasos, mi pasado, presente y futuro

Para el Maestro Gabriel Ramírez, por el apoyo y entrega en este trabajo, por su compromiso en el forjamiento de ingenieros librepensadores.

Para el Licenciado Fernando Franco, por ser impulsor de desarrollo, por brindar igualdad de oportunidades en aras de alcanzar un estado de justicia, aun lejano pero no imposible.

Para mi Madre Estela Victoria, quien con mano cariñosa y firme encaminó mis pasos en mis incipientes años, por su amor, consejo y su desvelo.

Para mi Padre Benito Gómez, por sus enseñanzas y disciplina, por el pensamiento racional que me inculco.

Para mis amigos, que han compartido conmigo sus triunfos y desavenencias en el camino de la Universidad y de la vida, en especial a Josué Amaya, por su apoyo desinteresado en mis largas ausencias.

Para Alina y André, por saber esperar, por enseñarme la valía del amor en su forma más pura, por estar ahí... siempre.

Para Pablo y Douglas, mis hermanos, por su incondicional cariño, por compartir y diseñar desde la infancia mis anhelos más puros y legítimos.

Para los mexicanos que hacen posible la existencia de la Universidad Pública en la cual depositan parte de la esperanza de alcanzar un México libre y justo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BACA, Gabriel U. (2004) *“Evaluación de Proyectos”* UPIICSA IPN.404 pp.

BOLIVAR, V. H. (2001): *“Elementos para la Evaluación de Proyectos de Inversión”*. Facultad de Ingeniería, UNAM, México DF

Evaluación Económica del Proyecto Francisco I Madero (1999) Torreón Coahuila. SIPSA.

GRAJALES, Fernando (1994) *“Alternativas al manto convencional en minas subterráneas”* Revista Geomimet. México DF.

HARTMAN, Howard L (1992) *“Mining Engineering Handbook”* Volumen 1. SME, 2394 pp.

http://www.sgm.gob.mx/aimmgm/inic_cons.jsp

HUSTRULID, William A. (2001) *“Underground Mining Methods: Engineering Fundamentals and International Case Studies”* SME, 718 pp.

JAAKONMÄKI, Ari. (2012) *“Aspects of Underground Primary Crusher Plant Design”* Metso Minerals Inc.2012

KELLY, Errol G (1990) *“Introducción al procesamiento de minerales”* Noriega Editores 1990

Mining Methods in Underground Mining, Atlas Copco, Second Edition 2007

MORALES, Arturo M. (1983) *“Cómo determinar el tamaño de una planta de beneficio”* Revista Geomimet. Mexico DF.

Norberg C- Crushers, Metso Minerals. Catálogo PDF

Proyecto Tiro, Unidad Tizapa. SAPSA 2012, Torreón Coahuila

WILLS. Barry A. (1979) *“Wills’ Mineral Processing Technology”* The University of Queensland, 453 pp.