



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

METODOLOGÍA PARA INTEGRACIÓN DEL PROCESO MINA & PLANTA

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGISTER EN
GESTIÓN Y DIRECCIÓN DE EMPRESAS

ROBERTO ANDRES ROJAS RIVERA

PROFESOR GUÍA:
LUIS ZAVIEZO SCHWARTZMAN

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
ENRIQUE JOFRÉ ROJAS
LORETO BURGOS RODRIGUEZ

SANTIAGO DE CHILE
2021

RESUMEN DE TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE:
Magister en Gestión y Dirección de Empresas.

POR: Roberto Andres Rojas Rivera

FECHA: 30 de abril de 2021

PROFESOR GUÍA: Luis Zaviezo Schwartzman.

METODOLOGÍA PARA INTEGRACIÓN DEL PROCESO MINA & PLANTA

En la industria minera constantemente se habla respecto de la productividad que se debe alcanzar para mantenerse competitivo, y para un negocio que requiere una alta inversión, posee buen grado de incertidumbre, la mayoría de las operaciones utilizan la metodología de Integración Mina & Planta” como filosofía para producir más por unidad de tiempo. Sin embargo, habiendo visto como se implementa esta filosofía en algunas compañías mineras, sumado a las opiniones de profesionales del rubro, se ha logrado detectar que no todas las compañías implementan correctamente la metodología, simplemente no se tiene experiencia al respecto o bien solo se habla de ella sin hacerla real, lo que no permite agregar el valor que se promete o se ha conseguido en otros sitios.

Entonces, este proyecto de tesis consiste en definir una metodología clara y simple, para que en las compañías mineras, independiente del lugar o región en donde se encuentren, logren implementar adecuadamente la filosofía de Integración de Mina & Planta, y con ello generar más valor o excedentes en un determinado periodo de tiempo. Para concretar lo anterior, revisaremos primero los conceptos teóricos en que se sustenta, luego construiremos un modelo en el cual la metodología pueda desarrollarse, para finalmente establecer la metodología y justificarla económicamente.

Para responder la clásica pregunta de ¿Dónde está el Negocio?, la metodología propone agregar valor en las compañías mineras, casi sin realizar ningún tipo de inversión o muy marginal, ya que los beneficios que se obtendrían serían a partir de la integración de los procesos ya existentes hacia un fin común, o sea, un proceso global más eficiente.

Respecto de los plazos o tiempos en que la implementación de esta metodología comienza a entregar frutos, la experiencia ha demostrado que los plazos son casi inmediatos, de uno a dos meses para los primeros resultados de agregación de valor, lo cual también se ha visto, tiene una curva de tendencia creciente y logra una estabilidad o madures al cabo de un año aproximadamente. Desde el punto de vista de los resultados, los más plausibles son los relacionados con una baja en los costos de operación global, la generación de más elemento de valor por unidad de tiempo, o sea, un mayor margen por unidad y más unidades producidas. También, hay otro tipo de resultados que son menos cuantificables, como por ejemplo que los equipos de trabajo lo hacen sobre un fin común, lo que permite estrechar lazos y generar las confianzas que repercuten en los cambios culturales que las compañías tanto valoran.

Lo mejor de la Integración de Mina & Planta, los elementos para hacerla efectiva casi siempre están dentro de la organización, por lo cual si se cuenta con un buen patrocinador, un mínimo de inversión y se aplica el método propuesto, se pueden aumentar los excedentes entre un 5% al 8%, al cabo de un año de implementación, según demuestran los casos estudiados.

Dedicatoria.

A mi madre y mis hermanas, que me enseñaron que con honestidad, esfuerzo y disciplina, los momentos difíciles se pueden transformar en aprendizaje, satisfacción y plenitud.

A mi esposa e hijos, quienes son mi propósito en la vida y que siempre me dan la confianza cuando se presentan nuevos desafíos.

Agradecimientos.

A Don Alejandro Cuadra y Juan Fco. San Martin, que desde Codelco me dieron la oportunidad de participar de este programa.

A la Universidad, por generar un espacio tan enriquecedor, el cual comienza con un grupo de colegas y termina con uno de amigos. También, a las personas que conforman el Staff del MBA Minero, en especial al profesor Luis Zaviezo, a Ulda a Claudia y a Marisol, por su entrega más allá de lo que la función formalmente indicaba.

A mis colegas mineros que desinteresadamente aportaron con experiencia e información, Victor Torres, Cristian Rojas, Richard Araya, Javier Morales, Luis Bravo y Victor Sandoval, gracias por su apoyo.

Al grupo de trabajo/amigos con los cuales sacamos adelante el programa, Camila, Romina, Maria y Andres, gracias por la entrega, y de seguro cuando pase la pandemia nos volvemos a reunir.

Finalmente, a Tomás Gonzáles y el grupo corporativo de mejoramiento continuo de Freeport McMoran, que hace años me dieron la oportunidad de ser Campión Mine to Mill, y a partir de ello aprender en detalle la importancia de la filosofía de Integración de Mina y Planta.

TABLA DE CONTENIDO

1	1.- Introducción
2	2.- Objetivos.
2	2.1.- Objetivo Principal
2	2.2.- Objetivos Secundarios
3	3.- Marco Conceptual.
11	3.1.- Definiciones
13	3.2.- Etapas del proceso
13	3.2.1.- Caracterización de la Roca y Minerales.
14	3.2.2.- Secuencia o estrategia de explotación.
16	3.2.3.- Perforación y Tronadura.
19	3.2.4.- Chancado.
21	3.2.5.- Molienda.
24	3.3.- Estado del arte
24	3.3.1.- Caracterización de la Roca y Minerales
25	3.3.2.- Secuencia o estrategia de explotación.
27	3.3.3.- Perforación y Tronadura.
28	3.3.4.- Chancado.
29	3.4.4.- Molienda.
30	4.- Análisis de la problemática y metodología.
30	4.1- Análisis de la problemática
31	4.2- Metodología
32	5.- Desarrollo.
32	5.1.- Modelo Base (Etapa 1)
35	5.2.- “Mejoramiento” Modelo Base (Etapa 2)
44	5.3.- Redefinición del modelo

46	6.- Producto o metodología.
46	6.1.- Documentación de la metodología
48	6.2.- Esquema de la Metodología
49	7.- Justificación económica y sensibilidad
49	7.1.- Caso teórico
52	7.2.- Casos prácticos
59	8.- Conclusión.
61	9.- Bibliografía y Referencias
62	10.- Anexos

1.- Introducción.

La producción de metales, en especial lo relacionado con la industria del cobre, tiene la particularidad de que independiente del lugar en donde se realice, la técnica utilizada es más bien similar, con procesos productivos técnicamente muy específicos, productos comercializables estándar y un mercado regulado por precios de venta que son casi imposible de controlar. Entonces, las compañías mineras en su afán de generar más excedentes, centran su gestión en producir cada vez más y gestionar correctamente los costos para obtener un mayor margen, por lo cual constantemente se está en la búsqueda de nuevas ideas, técnica o soluciones que vayan en la dirección antes indicada.

“La mente que se abre a una nueva idea, jamás volverá a su tamaño original”

Albert Einstein

Una de las ideas, a la cual constantemente la industria minera recurre, es la denominada Integración de Mina & Planta, en la cual se busca producir más de elemento de valor por unidad de tiempo, a un mejor costo, en función de aplicar la filosofía de operar bajo un fin común, sin importar si alguno de los procesos se encuentra fuera de su mejor estado, o sea, aplicando el concepto de que “el óptimo de todos los procesos, no es necesariamente el óptimo de un negocio”. En este sentido en la industria minera se han ejecutado una serie de iniciativas, pruebas, casos de estudio, análisis, etc, respecto de los beneficios de la integración, sin embargo no hay evidencia documentada de una metodología clara, simple o transversal que se pueda aplicar.

Entonces, en este informe busca entregar una metodología para la implementación de la Integración de Mina & Planta, a partir del desarrollo de un marco conceptual con definiciones, etapas y las diferentes iniciativas aplicadas en la industria, para luego establecer con claridad la problemática, generar un modelo a aplicar y finalmente construir una metodología justificándola económicamente. Punto central en este informe, es la información recogida de experiencias exitosas realizadas en la industria Chilena y también en otros países, con datos e información de casos reales, lo que da aún más valor a este informe.

2.- Objetivos.

2.1.- Objetivo Principal

El objetivo principal es generar una guía metodológica que sirva como pauta para la implementación de la integración de los procesos Mina & Planta, desde lo más básico del negocio minero, hasta los detalles más relevantes o claves de los procesos, con la finalidad de que la integración perdure en el tiempo y se arraigue en la cultura de cada compañía.

2.2.- Objetivos Secundarios.

- Demostrar los beneficios que genera la integración de Mina & Planta y la magnitud del aporte o generación de valor al negocio.
- Generar un marco conceptual claro, simple respecto de los aspectos y variables claves para la integración de Minas & Plantas.
- Responder a la siguiente pregunta ¿Por qué si el proceso de integración Mina & Planta es tan reconocido, solo un grupo de compañías mineras lo aplica e implementa de manera adecuada?.

3.- Marco Conceptual.

El negocio minero se centra principalmente en una serie de etapas o procesos que tienen por objetivo recuperar o liberar el elemento o compuesto de interés en el menor tiempo posible y con el menor de los esfuerzos. Cuando se indica que es con el menor esfuerzos, económicamente lo que se propone es que es al menor costo, a su vez cuando nos referimos al menor tiempo posible, lo que hay detrás, es que es produciendo la mayor cantidad del elemento o compuesto de interés por unidad de tiempo.

Al revisar la ecuación fundamental de beneficio del negocio, y la clásica forma en la que se determina el valor presente neto y otros indicadores de retorno, se puede entender que hay variables fundamentales que hacen muy sensible y variable los excedentes o utilidades que se pueden obtener en el negocio minero. Dentro de las variables más relevantes del negocio están la ley del mineral, la proporción recuperable del elemento o compuesto de interés, el precio de venta del elemento y por su puesto la cantidad de elemento que se desea comercializar.

Beneficios = Ingresos - Gastos

$$B = (Tt \times Ley \times Rec \times P) - (Go + Gg - Cr + Gc)$$

B: Beneficio

Tt: Mineral tratado

Ley: Proporción del elemento o sustancia de interés

Rec: Proporción recuperable.

P: Precio del elemento o sustancia de interés.

Go: Gasto operacional.

Gg: Gasto general y de administración.

Cr: Crédito por subproductos.

Gc: Gastos de Capital.

Ecuación 1.- Ecuación Fundamental de Beneficio en el Negocio Minero

Fuente: Elaboración Propia

De acuerdo a la fórmula planteada, se aprecian tres tipos de variables, en función a la gestión que la empresa puede realizar sobre ellas, y como ellas se relacionan entre sí.

- Variable Independiente: Para nuestros efectos el precio del producto, en este caso del cobre, ya que es una variable cuyo efecto determinan la cantidad de beneficio y a su vez es muy poco probable de controlar. La ley de los recursos también puede ser una variable independiente, ya que no se puede alterar la cantidad y distribución de lo que se encuentra en el yacimiento, a lo sumo discriminar la proporción de interés.

- Variable Dependiente: Como una variable dependiente es la resultante de la variación de una variable independiente, los costos de proceso y de capital son este tipo de variables.
- Variables Moderadoras: Son aquellas variables que alteran la relación que existe entre las variables dependientes e independientes, en este caso la recuperación y el tratamiento.

Con la definición de las variables y la estructura de la ecuación, podemos entender que la primera gestión que la empresa minera en operación puede y debe hacer, para maximizar el beneficio, es la relacionada con la gestión del tratamiento y la recuperación. Si realizamos una simplificación de la ecuación, obtendremos que el tratamiento es un multiplicador del margen, de ingresos (I) menos los costos (C), por lo cual mientras exista margen de acuerdo a las condiciones de mercado y la correcta gestión de los costos, el tratamiento será la pendiente que determinara el beneficio en la ecuación.

Ahora que hemos definido que el precio y la ley son variables que no se pueden controlar, ya que la primera está determinada por el mercado global, compuesto por un sin número de empresas mineras, y la segunda es resultado u obra de la naturaleza a partir de millones de años de trabajo, se desprende que el tratamiento y la recuperación son dos de las variables más importantes que debemos gestionar en una empresa minera una vez que esta está operando, por lo cual una pregunta surge de inmediato, cuál de las dos es más relevantes?, se puede buscar el mejoramiento de ambas?.

Antes de responder a las primeras preguntas planteadas, es necesario entender que cuando se define o diseña un proyecto minero, se hace sobre una base de supuestos que ya tienen determinado cuales debieran ser los tratamientos y la recuperaciones por periodo, esto en base a pruebas o ensayos “pilotajes” según la litología o tipos de rocas existentes en el deposito mineral, contrastado con la capacidad instalada de planta y/o proceso. Lo anterior podría hacer entender que el tratamiento y la recuperación son variables predefinidas y fijas, que son difícil de mejorar, pero más adelante veremos que en realidad los supuestos con que fueron o son determinadas, dependen de otras variables, que son las que debemos gestionar para lograr la integración de los procesos de Mina & Planta.

En la siguiente figura se representa el ciclo de planificación o presupuesto, a partir de las variables y procesos más relevantes del negocio, en la cual se puede notar que el proceso tiene por objetivo la maximización de los beneficios a partir de la optimización iterativa de las etapas, a partir de las variables internas más relevantes. También se puede apreciar en la figura 1, que en esencia el negocio minero puede ser representado como una serie de etapas o procesos que buscan liberar el elemento de interés a partir de procesos de conminución y concentración, o sea, de una transformación principalmente mecánica de las rocas que contienen el elemento.

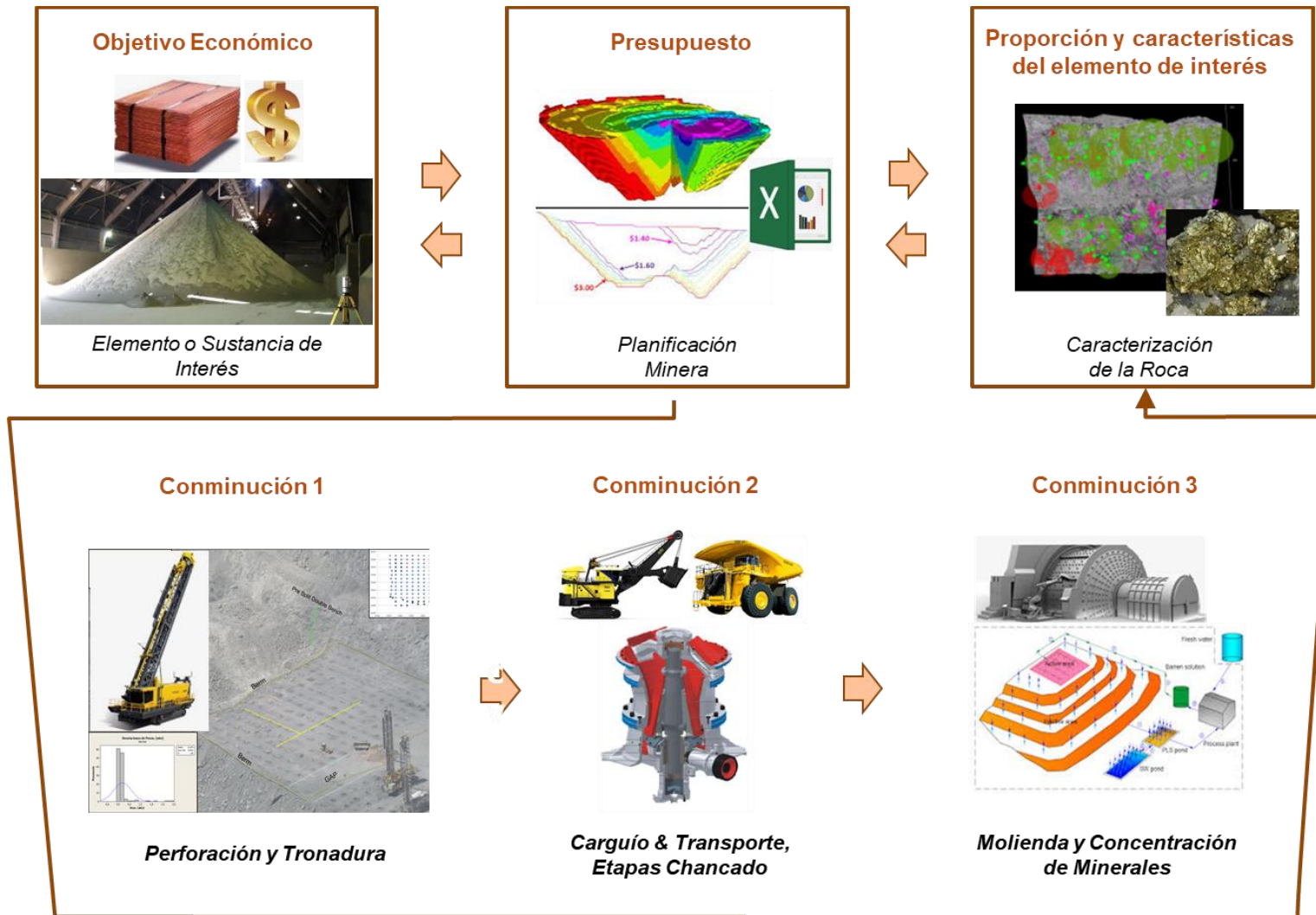


Figura 1.- Ciclo de planificación o presupuesto en el negocio minero.

Fuente: Elaboración Propia

Para responder a las preguntas planteadas anteriormente, relacionadas con el tratamiento y la recuperación, cuál de las dos es más relevantes? o si se puede buscar el mejoramiento de ambas?, se debe primero entender los conceptos de la etapa de concentración, producto que en esta etapa es donde el elemento de interés, dada su cantidad y calidad, toma valor y se acerca o no al objetivo económico presupuestado.

La concentración de minerales es una etapa intermedia en el contexto de la metalurgia extractiva y algunas veces la etapa final de algunas plantas, principalmente para el caso de los minerales industriales. Básicamente la concentración de minerales es la operación en la cual se eleva la ley o porcentaje de una mena mineral determinada, mediante el uso de equipos de separación de sólidos, produciéndose así la segregación de dos o más especies mineralógicas y con ello generar un flujo enriquecido en un mineral de interés.

Existen diversos métodos de separación, y para nuestro caso o estudio, el interés se centrara en los que tengan relación con el cobre como elemento de valor. En la tabla adjunta se aprecian diferentes métodos de concentración y se encuentran destacados los relacionados con el cobre.

Nombre del Método	Propiedades que emplea para separar	Principales equipos utilizados
Concentración Gravitacional	Diferencia de velocidad de sedimentación de los minerales	Sedimentador, Espezador, Hidrociclón, Mesa Vibratoria Centrifugas, Jig, etc.
Concentración Magnética	Suceptibilidad Magnética (Atracción o no frente a un magneto o imán)	Separador Magnético de Tambor, Rodillos, Separador tipo Carrusel
Concentración Eléctrica	Conductividad Eléctrica	Separador Eléctrico de Alta Densidad
Flotación Espumante	Hidrofobicidad y/o Hidrofilidad del H mineral (Tiene la propiedad de humectarse o mojarse)	Celdas de Flotación y Columnas de Flotación.
Floculación Selectiva	Adsorción Específica de un Polímero y Formación de Flóculo.	Sedimentador
Coagulación Selectiva	Adsorción Específica de Iones Inorgánicos y Formación de un Coágulo.	Sedimentador

Tabla 1.- Métodos de concentración de minerales.

Fuente: Notas de Concentración Minerales, IM CIMEX, 2008.

Al analizar con detención la tabla 1, podemos percatarnos que los métodos de concentración de los minerales, o sea, la adecuada separación, debe existir entre los elementos, compuesto o minerales a separar al menos una propiedad distintiva y que tenga valores relativamente diferentes para esa característica, tales como la gravedad específica, susceptibilidad magnética, conductividad eléctrica o respuesta físico química superficial, la cual se denomina *propiedad diferencial*.

Resumiendo, el objetivo de la concentración será entonces el enriquecer el mineral o elemento de valor y separarlo de aquel que se ha visto empobrecido, minimizando las pérdidas de mineral útil en cuanto más sea posible. Esto significa entonces que la ley del mineral, será la relación que existe entre la cantidad másica de mineral de interés o útil, respecto de la cantidad másica o volumétrica del total de la mena. Por lo tanto, la ley se puede expresar en gramos de mineral útil por tonelada de material total, o también en porcentaje, miligramos por metro cúbico de material total, etc.

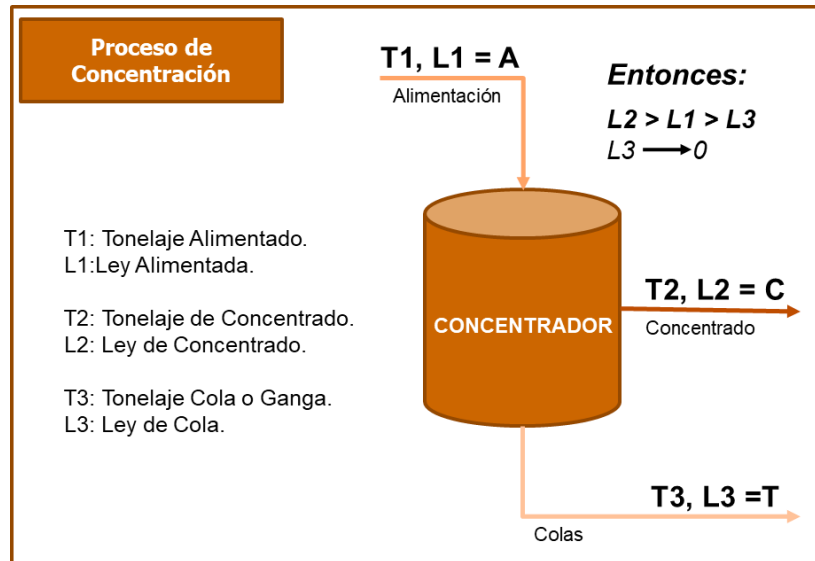


Figura 2.- Simplificación Proceso de Concentración.

Fuente: Elaboración Propia

En el caso ideal, la ley de la especie mineral de interés en las colas (L3) deberá ser nulo o cercano a cero. Ahora bien, como es muy difícil alcanzar en los procesos situaciones ideales, una vez que se han realizados todos los ensayos metalúrgicos con las especies mineralógicas, se determina un valor o meta de ley de cola, que a su vez definirá técnicamente la recuperación metalúrgica que se debe alcanzar.

Ahora que hemos repasado los conceptos relacionados con la concentración de minerales, la idea es profundizar un poco más acerca de uno de los índices metalúrgicos importantes, estamos hablando de la recuperación (Rec). Entonces se define la recuperación como la relación que existe en una operación de concentración el peso del material útil o de interés que hay en el concentrado, con respecto a la cantidad de ese mismo mineral que hay en la alimentación, o que ingreso a la operación.

$$\text{Rec} = \frac{\text{Peso de Mineral de Interés en Concentrado}}{\text{Peso de Mineral de Interés en Alimentación}} = \frac{\text{T2 x L2}}{\text{T1 x L1}}$$

Ecuación 2.- Índice Metalúrgico Recuperación

Fuente: Elaboración Propia

Lo anterior indica, por ejemplo, que una recuperación del 80% sugiere que el 80% del mineral de interés que ingreso por la alimentación fue recuperado, y el 20% restante de este mineral de interés se pierde en las colas.

Como vimos en los métodos de concentración, entonces la cuestión es que cuando el elemento de interés llega al proceso de concentración, debe hacerlo con las características o *propiedades diferenciadoras lo más exacerbadas posibles*, o sea, para nuestro caso con un grado de liberación de partícula suficiente para que la propiedad diferenciadora sea utilizada al máximo y así ejecutar la concentración. Se desprende entonces que para llegar a ese grado de liberación, el mineral alimentado tiene que cumplir con algunos estándares respecto de su granulometría o grado de fragmentación y así estar acorde a las expectativas de la concentración, por lo cual el cumplir con estas expectativas tomara un tiempo mayor o menor dependiendo de las características de la roca y con ello entonces se ha generado la *dependencia entre el tratamiento y la recuperación*.

Se puede notar a partir de lo indicado en el párrafo anterior, que hay un cierto antagonismo entre la Recuperación (Rec) y el mineral tratado o simplemente Tratamiento (Tt), que inclusive tiende a aumentar cuando no solo miramos las variables moderadoras, sino que también si miramos las variables independientes. Esto dado que cuando por ejemplo existen alzas de ley de mineral en la alimentación o simplemente existe un precio de cobre alto, los incentivos por producir más del elemento o sustancia de interés no son apalancados necesariamente por buscar el óptimo o ideal en la recuperación, cumpliéndose la clásica cita “el óptimo de todos los procesos no son necesariamente el óptimo del negocio”, la cual validaremos más adelante cuando valoricemos y sensibilicemos distintos escenarios de negocio.

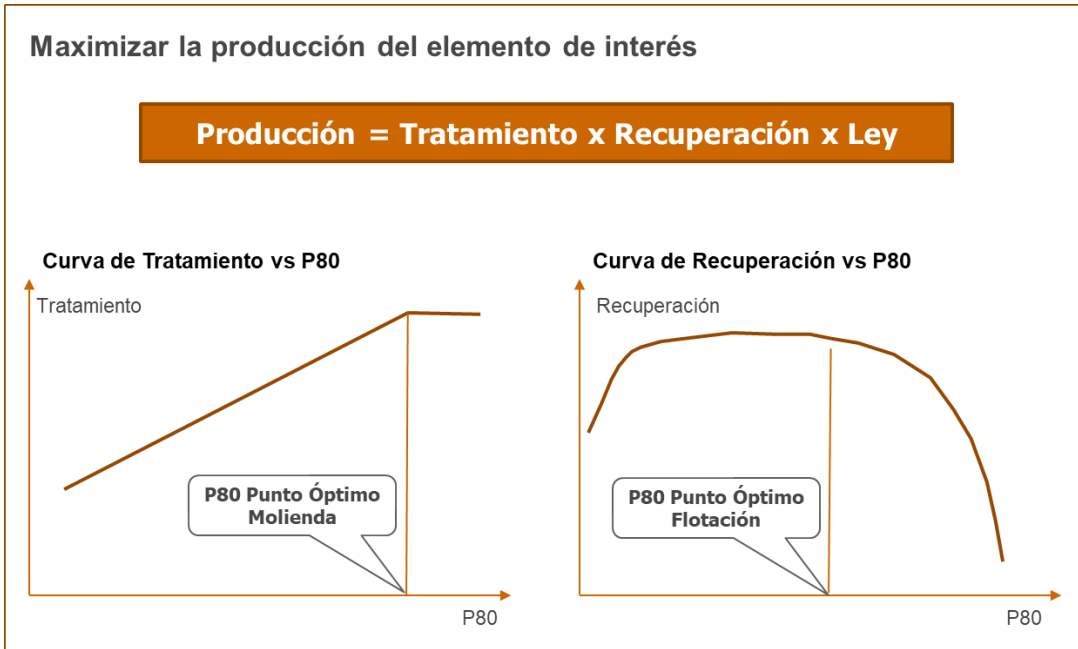


Figura 3.- Puntos Óptimos de Tratamiento y Recuperación en Función de la granulometría.

Fuente: Compañía Minera 1, Chile.

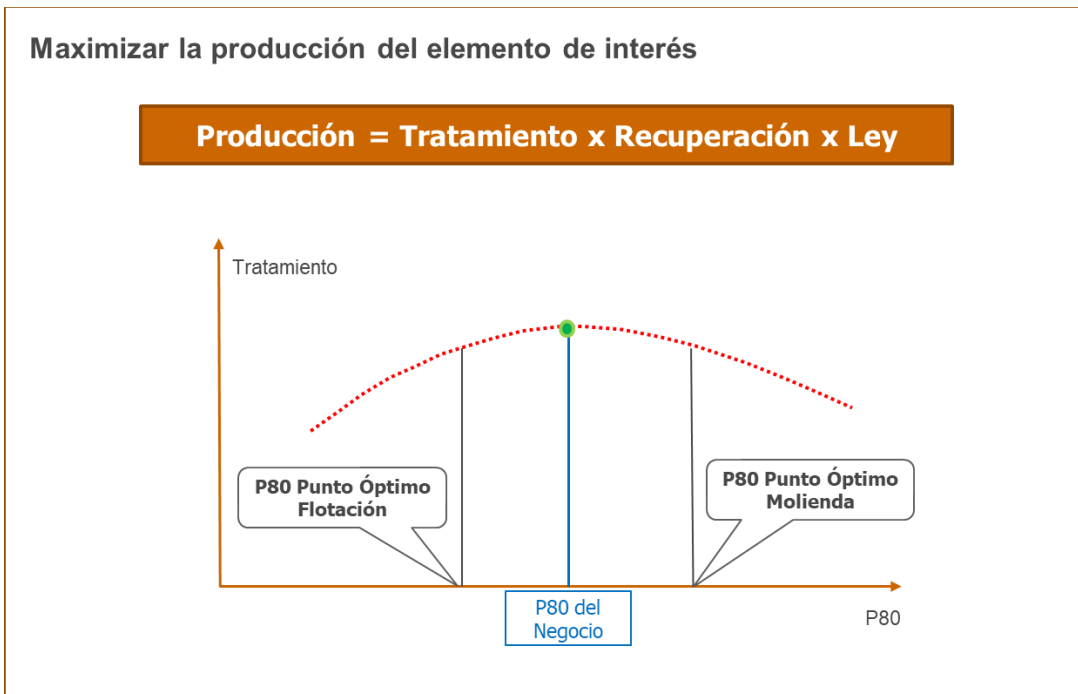


Figura 4.- Puntos Óptimos de Conminución del Negocio.

Fuente: Compañía Minera 1, Chile.

De la fórmula de producción desprendemos entonces que el tratamiento y la recuperación tienen aparentemente igual relevancia en la búsqueda de maximizar la producción del elemento de interés y con ello del negocio, sin embargo dada la magnitud y rango en que se mueven estas variables, sumado a los esfuerzos que significan lograr el óptimo de una y otra, sabemos que la recuperación casi en ninguna ocasión cumplirá con el ideal de la etapa de concentración, que es llevar la ley de cola a cero, más bien tendera a estar desviada del ideal, cuando al momento buscar el óptimo económico del negocio, se indique que el tratamiento es la vía más sencilla en función del esfuerzo y también cuando las otras variables de la ecuación elemental del negocio, indiquen que es el momento de producir más, ajustando la variable que tiene más espacio para mejorar. Dicho de manera simple, un aumento del tratamiento generalmente será más factible que compense una merma en la recuperación, e inclusive mejore el negocio en el global, esto sin perder de vista que existen estándares de operación o puntos de equilibrio que no se deben sobrepasar para desbalancear negativamente la producción de final.

Habiendo entendido que el tratamiento es una de las variables más importantes del negocio, si no que distintivamente la más importante sobre la cual podemos influir directamente, entonces debemos internalizar que el tratamiento no es solo el mineral que se procesa en una planta como comúnmente se tiene aceptado, más bien es la cantidad de mineral procesado hasta llegar al óptimo de concentración económica por unidad de tiempo, o sea, desde que se arranca la roca del cerro, hasta que se obtiene la concentración esperada. Como vimos en la figura número 1, para lograr procesar el mineral que está contenido en una mena o en la roca, esto se realiza mediante varias etapas, siendo las más relevantes la de *conminución* y la de *clasificación*, etapas que más adelante demostraremos son el centro de la Integración de Minas & Plantas.

3.1.- Definiciones.

Basado en lo expuesto en el punto anterior, y a partir de la fórmula de producción del elemento de interés, se define que principalmente la Integración Mina y Planta está relacionada con ajustar el tratamiento como respuesta a la maximización de los ingresos en el negocio minero. Lo que se indica es ajustar, y no necesariamente maximizar el tratamiento, dado que existen algunas excepciones en que lo más cercano al óptimo no necesariamente es procesar o tratar la mayor cantidad de mineral posible, aunque estos casos son muy singulares y excepcionales.

Algunas de estas excepciones suelen ser:

- Límite de capacidad del proceso de concentración.
- Límite de capacidad del transporte de concentrados.
- Restricciones operacionales por estado de los activos, como por ejemplo evitar un daño mayor por falla, desgaste ante la falta o espera de un repuesto.
- Alzas de ley imprevistas que generen un aumento de concentrado fuera de estándar.

Si hacemos a un lado las excepciones, y tomamos como definición que el objetivo del negocio si es procesar la mayor cantidad de mineral posible por unidad de tiempo, entonces la búsqueda se centra en cómo hacer que todos los procesos unitarios, desde que se planifica la extracción del mineral, se alineen con el objetivo común.

Producción = Tratamiento x Recuperación x Ley

$$\text{Conc (ton)} = \text{Tt (Ton)} \times \text{Rec (\%)} \times \text{L (\%)}$$

Ecuación 3.- Función de Producción

Fuente: Elaboración Propia

Antes de pasar a las etapas del proceso, definiremos algunas propiedades de los minerales, con la idea de que cuando presentemos el método a utilizar para fragmentar o triturar la roca, el ¿cómo y por qué? se aplica tal técnica para intentar liberar el mineral o elemento de interés, dependiendo en la etapa que nos encontremos, sea internalizada de mejor manera.

Los minerales o el elemento de interés no se encuentran de manera aislada o liberada en la mena, en la matriz o en la roca. Para realizar esta separación o liberación, ocupamos procesos de conminución sucesivos que van reduciendo el tamaño de la roca hasta liberar el elemento o mineral, dado que en su esencia los minerales son partículas mixtas dentro de un todo.

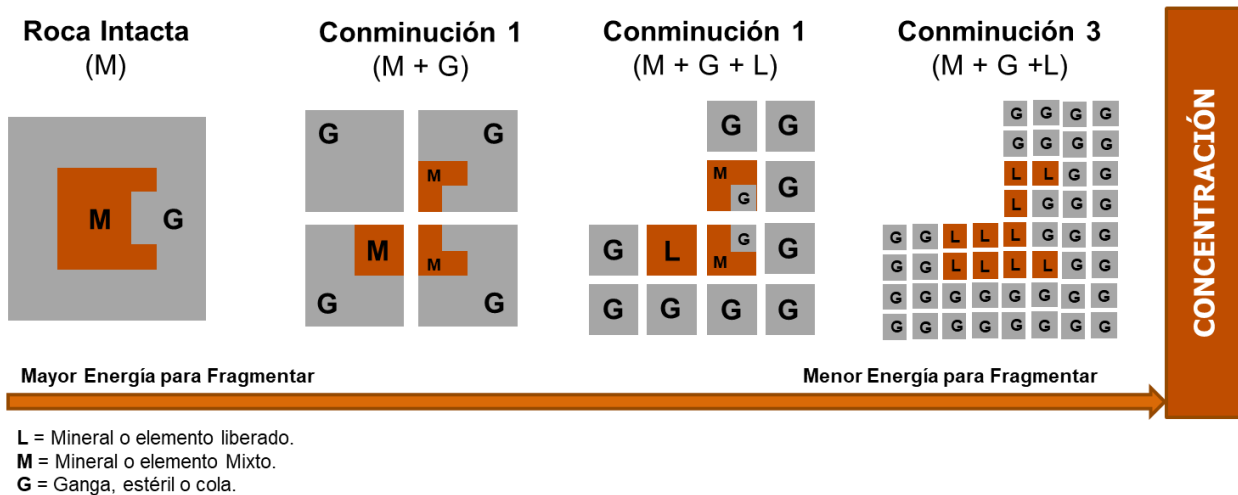


Figura 5.- Esquema de liberación del mineral, desde partículas mixtas a mineral o elemento de mineral liberado.

Fuente: Elaboración Propia

Como se aprecia en la figura número 5, los minerales o elementos de interés se encuentran generalmente diseminados en la roca o mena, y es con una serie de etapas de conminución y clasificación que se logra el grado de liberación necesario para pasar al proceso de concentración. La figura es un esquema ideal, ya que naturalmente no todo el mineral lograra ser liberado, y de acuerdo al grado de liberación, es que obtendremos la calidad de nuestro concentrado y por ende la recuperación global del elemento valioso.

Antes de pasar al punto en donde serán definidas y explicadas las etapas del proceso, debemos aceptar una serie de definiciones o significados respecto de las características físicas de los minerales, sobre todo aquellas que tienen estrecha relación con la trituración, fragmentación y en general con la conminución de una roca y/o mineral, lo cual se aprecia y recomienda revisar antes de continuar (Anexos 10.1).

3.2.- Etapas del proceso.

Las etapas más relevantes de negocio minero, desde el punto de vista de la producción, en específico de la conminución y concentración son:

- Perforación y Tronadura – Conminución.
- Carguío y Transporte – Clasificación.
- Acopio de Minerales – Stock.
- Etapas de Chancado – Conminución.
- Acopio de Minerales – Stock.
- Transporte Planta – Clasificación.
- Etapas de Molienda – Conminución.
- Flotación y Filtrado – Concentración.

En lo que concierne a este documento, la definición de estas etapas será carácter general y no con todo el detalle técnico que cada proceso tiene, dado que lo que nos interesa más bien son los roles y funciones que cada etapa cumple en el proceso completo, por sobre el fin particular de cada una de ellas. En virtud de lo anterior, y sabiendo que lo que nos convoca es principalmente la liberación del elemento de interés, con el menor de los esfuerzos posibles, las etapas de conminución serán las que principalmente se desarrollen, ya que son el centro del proceso de Integración Mina & Planta, sin desconocer que el resto de las etapas también cumplen una función relevante.

A simple vista entonces se identifican 3 etapas operativas que son muy relevantes o la columna vertebral del proceso completo, ellas son las *tronadura o voladura, el chancado y la molienda*. Estas tres etapas buscan, a través de procesos principalmente mecánicos, fragmentar la roca al punto de que se pueda recuperar o concentrar el elemento de interés, pero de inmediato surge otra pregunta, cuales son las características, de donde provienen y en qué cantidad las rocas que deseamos reducir a su mínima expresión?. Al responder esta pregunta, nos damos cuenta que hay otras etapas no tan operativas, pero igual de relevantes al momento de definir cuál es la mejor manera de lograr la liberación de elemento de interés, estas *etapas son la caracterización de la roca y la planificación o secuencia de explotación*.

3.2.1.- Caracterización de la Roca y Minerales: Como se indicó al final del punto anterior, los minerales y/o las rocas tienen características particulares, las que en su conjunto hacen que cada una de ellas presenten mayor o menor resistencia a ser fragmentadas, o dicho de otra forma, requieren de un mayor esfuerzo o consumo de energía para lograr el grado de conminución deseado.

Es sumamente relevante obtener una caracterización completa de las rocas que se desean fragmentar o tratar, lo cual debe realizarse tanto en etapas prematuras como sondajes o en pleno proceso productivo como sondajes de confirmación, muestreo de pozos de perforación, mapeo, pilotajes, etc.

ITEM	INDICADOR
Tipo de roca	Litología predominante (Códigos)
Clasificación por grado de fracturamiento	Cizallada, Fractura, Intacta (Códigos)
Clasificación por nivel de dureza	Dura, Intemedia, Blanda (Códigos)
Resistencia al la rotura	Mpa (Mega pascales)
Designación de la calidad de la roca	RQD (Rock Quality Designation)
Indice de trabajo relacionado con la tenacidad	Wi (Work Index o Indice de Bond)
Indice rendimiento molino	SPI (Sag Power Index)
Consumo especifico de energía en Molienda	CEE (Consumo específico de energía)

Tabla 2.- Indicadores comunes que se pueden obtener al caracterizar una roca.

Fuente: Elaboración Propia

En la tabla anterior se presentan algunos de los indicadores más relevantes que deben ser determinados al momento de caracterizar la roca o especie mineralógica, pensando en la integración del proceso y un lenguaje técnico común, entendiendo también que existen muchos otros que son específicos de cada proceso.

3.2.2.- Secuencia o estrategia de explotación: Ahora que ya conocemos las características más importantes de lo que deseamos fragmentar o conminuir, el segundo paso es saber el tamaño de las áreas que se desean explorar/extraer y su secuencia. El tamaño de las zonas, el orden en que se realizará la explotación y el tipo de equipos o máquinas, determinaran el ritmo que puede alcanzar en la mina y con ello el tamaño/tipos de tronaduras que se han de ejecutar para asegurar el ritmo (tratamiento) de los proceso aguas abajo.

En una mina explotada a Cielo o Rajo Abierto, se realiza comúnmente a través de bancos o plataformas de explotación, y en dichos bancos existen dos áreas principales, el área de producción y de contorno. Como su nombre lo indica, la zona de producción es un sector o polígono que tiene por objetivo fragmentar la roca a su mínima expresión, con la finalidad de que todos los procesos aguas abajo se vean beneficiados de esta primera etapa. Por otro lado, la zona de contorno, es un sector o polígono que tiene como primer objetivo realizar la explotación logrando el cumplimiento del diseño de la mina lo mejor posible, por lo cual no necesariamente buscara reducir o fragmentar las rocas a su mínima expresión, dada la energía límite que se puede y debe aplicar.

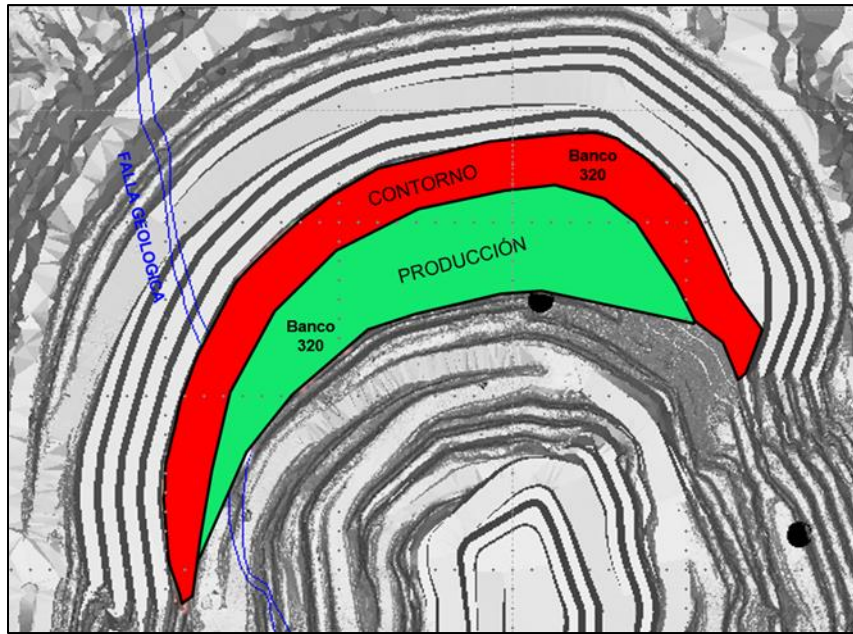


Figura 6.- Esquema en vista de planta de las zonas o áreas de explotación de un banco en mina a Cielo Abierto.

Fuente: Compañía Minera 2, Chile.

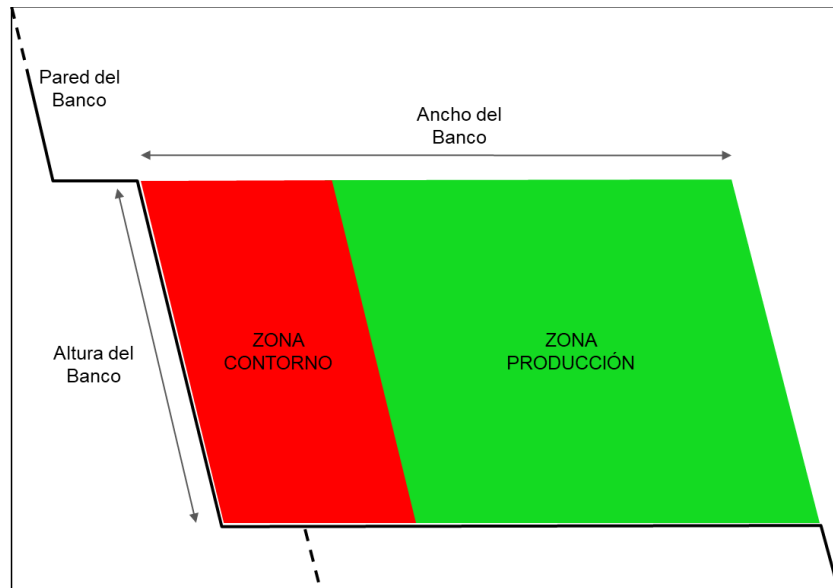


Figura 7.- Esquema en vista de perfil de las zonas o áreas de explotación de un banco en mina a Cielo Abierto.

Fuente: Compañía Minera 2, Chile.

La primera clasificación de que cantidad de roca es económicamente beneficiosa para procesarla, en base al contenido del elemento de interés y las capacidades de procesamiento, se realiza en esta etapa, por lo cual es aquí en donde se define a que grado de fragmentación debemos obtener en función del destino del material o roca y las características de las mismas.

3.2.3.- Perforación y Tronadura: Conocidas las zonas de explotación de un banco (contorno/producción), las características principales de la roca y el destino de las mismas, el proceso de perforación y tronadura es el primer proceso de conminución, en cual tiene por objetivo fragmentar la roca al nivel requerido, principalmente por el destino al cual será enviado y según la zona que se esté explotando.

Por zona del banco:

- **Contorno**, el objetivo es fragmentar la roca asegurando dañar al mínimo las paredes del o los bancos, y con ello respetar el diseño geométrico definido, para asegurar la explotación de los minerales futuros de la manera planificada. En este punto se busca dar la continuidad al negocio a mediano plazo, en base a la disponibilidad de minerales en el tiempo. Aquí el equilibrio entre el objetivo principal de cuidar la estabilidad del macizo rocoso (paredes o taludes) vs el objetivo secundario de enviar un mineral lo mejor fragmentado posible es el punto a resolver.
- **Producción**, el objetivo es fragmentar la roca a un nivel que permita hacer lo más eficiente posible los procesos aguas abajo, en especial los de chancado y molienda, para lo cual el nivel de energía o esfuerzo implementar debe ser el máximo sin pasar al punto de derrochar o desperdiciar el esfuerzo o energía.

Por destino del material o contenido del elemento de interés:

- **Mineral:** Teniendo en consideración la zona del banco a explotar, el objetivo es fragmentar la roca a un nivel que permita hacer lo más eficiente posible los procesos aguas abajo, intentando responder a los requerimientos granulométricos de Chancado y Molienda.
- **Lastre:** Teniendo en consideración la zona del banco a explotar, el objetivo es fragmentar la roca a un nivel que permita realizar eficientemente las actividades de transporte de los materiales estériles a su punto final de destino.

La técnica de perforar y tronar (volar), consiste básicamente en perforar agujeros, pozos, tiros o taladros de aproximadamente del largo del banco a explotar, de acuerdo a una especificación técnica que depende de los objetivos definidos anteriormente. A esta serie de especificaciones comúnmente se le define como patrón de perforación de tronadura, de la cual se enuncian sus aspectos más relevantes a continuación.

- Polígono de perforación y tronadura, que es un área, o volumen si consideramos la altura del banco, que se desea fragmentar.

- Diámetro de perforación, pudiendo ser más de uno en un polígono.
- Distancia entre pozos y filas de estos, o comúnmente conocido con barden y espaciamiento.
- Largo del pozo, generalmente de una longitud levemente superior a la altura del banco, con la finalidad de lograr un nivel parejo de excavación.
- Tipo de Explosivo, el cual dependiendo principalmente de su densidad, velocidad de detonación y otras características, provee de la energía requerida para fragmentar la roca.
- Taco o Tapón, parte superior del pozo que se rellena material estéril de un tamaño definido, que sirve como retenedor para que la energía del explosivo no escape o se fugue y pueda producir la rotura del macizo rocoso.
- Incitadores o “Booster”, Elementos o accesorios explosivos secundarios que inician la columna de explosivo primario que rellena el pozo de perforación.
- Secuencia de tronadura: Forma y dirección de salida de la tronadura en base a los tiempos de detonación.
- Tiempos de detonación, tiempos definidos para que cada iniciador o “booster” denote y con ellos se produzca la secuencia de tronadura, estos tiempos generalmente son tiempo entre pozos y filas.

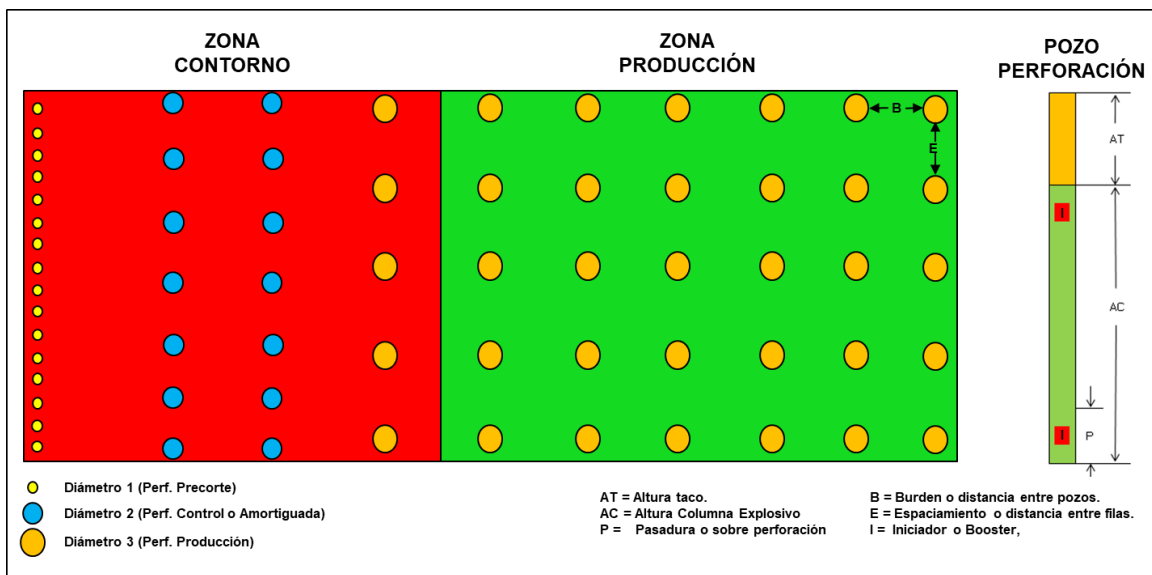


Figura 8.- Ejemplo de patrón de Perforación y tronadura.

Fuente: Elaboración Propia.

Una vez que se tiene todo listo para ejecutar la tronadura o voladura, o sea, se ha implementado el patrón de configuración, el resultado es un mapa de energía o de calor que representa como se distribuirá la energía y de alguna manera de predecirá cual será el resultado de fragmentación.

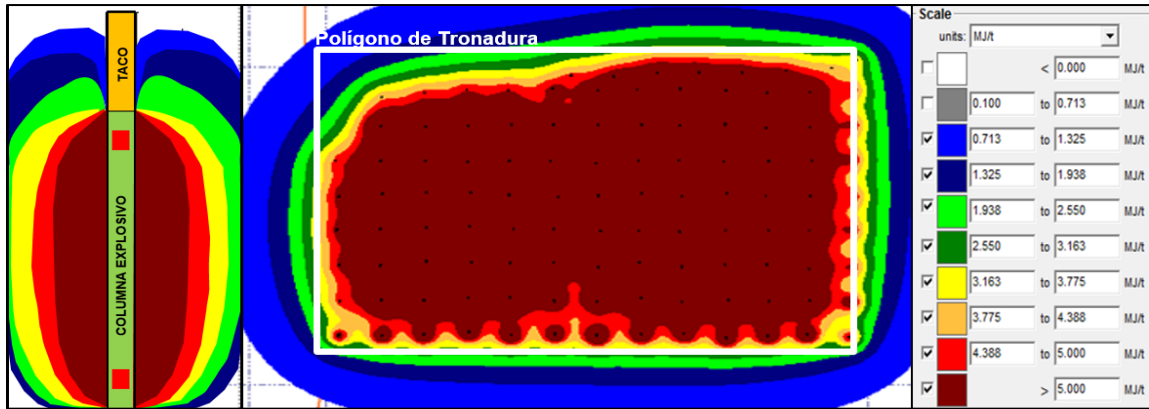


Figura 9.- Distribución de la energía dentro y fuera del polígono de tronadura o voladura. Ejemplo en zona de producción.

Fuente: Fuente: Compañía Minera 2, Chile.

Como se aprecia, existe una distribución de la energía que busca cubrir el polígono con la mayor cantidad de energía posible en razón a generar la mejor fragmentación, sin embargo en los límites del polígono, dentro y fuera de este, sumado a la zona del taco, la energía es insuficiente y no logra llegar al óptimo o el mejor resultado esperado desde el punto de vista de la fragmentación.

El resultado final del proceso o etapa de perforación y tronadura es un producto o roca fragmentada, que se representa bajo una distribución o curva granulométrica, y que está dada en función del tipo de roca, zona de explotación, tamaño del polígono de tronadura y el patrón de configuración de perforación & tronadura.

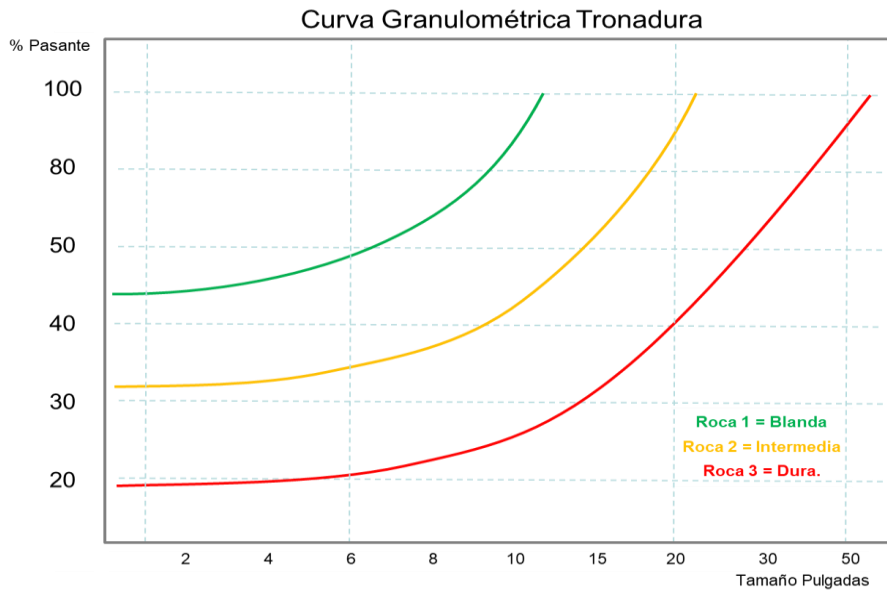


Figura 10.- Ejemplo curvas granulométricas de fragmentación posterior a la tronadura según clasificación de dureza de la roca.

Fuente: Compañía Minera 2, Chile.

Se ha concluido con la primera etapa de conminución, y el producto entregado es una cantidad de material o mineral definido, que ahora tiene una nueva característica, un grado de fragmentación que varía generalmente entre partes menores a una pulgada (finos), y otras inclusive superiores a las 50 (sobre tamaño o top size), lo cual obviamente depende de los aspectos y consideraciones mencionadas en los puntos anteriores.

3.2.4.- Chancado: El chancado es generalmente una operación en seco y usualmente realizada en 1, 2 o 3 etapas, y como ya apreciamos, el material alimentado al proceso oscila entre menos de una pulgada hasta rocas superiores al metro. El producto en la descarga, dependiendo de las etapas de chancado puede variar entre las 7-6 pulgadas en el chancado primario, hasta las tamaños menores a la pulgada en el chancado terciario, de 8 a 7 mm.

Las chancadoras primarios son máquinas de trabajo pesado, usados para reducir de tamaño al mineral proveniente de la mina (run-of-mine), hasta un tamaño apropiado para su transporte y posterior tratamiento. Estos equipos son operados siempre en circuito abierto, con o sin parrillas separadoras previas.

Para realizar el chancado primario hay básicamente dos tipos de equipos: chancadoras de mandíbulas y chancadoras giratorias, se prefiere una chancadora giratoria cuando se requiere tratar grandes tonelajes, siendo usualmente el elegido en plantas de gran capacidad. También existen las chancadoras de impacto, de uso muy limitado y para aplicaciones específicas.

Como se indicó anteriormente, el proceso de chancado es un trabajo pesado, por lo cual estos equipos realizan la conminución de las rocas mediante el uso de la potencia consumida, medida en unidad de energía (KW). Este consumo de energía o de potencia, está en función del tipo de roca, la cual se representa a través de su **índice de trabajo o work index (Wi=Kw/hr)**, el tratamiento deseado ($G_s=T_c/H_r$) y a los porcentajes de alimentación y descarga al 80% (P_{80} y F_{80} = pulgadas), en resumen a partir de la ecuación de Bond.

$$P_C = 10 \cdot G_s \cdot W_i \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{1}{\sqrt{F_{80}}} \right)$$

P_C = Potencia Consumida, G_s = Tratamiento, P_{80} = Porcentaje pasante alimentación, F_{80} = Porcentaje pasante alimentación.

En la siguiente figura se observa el trabajo que realizan generalmente las chancadoras primarias respecto del material con el que se le alimenta, pudiendo notar que el principal trabajo de este tipo de equipos es “acortar” el espectro o curva de distribución granulométrica, específicamente en aquellas rocas que presentan un gran tamaño. Por otro lado, y sin ser el objetivo principal, el proceso de chancado también es un generador de “finos” o particular con tamaños menores a la pulgada.

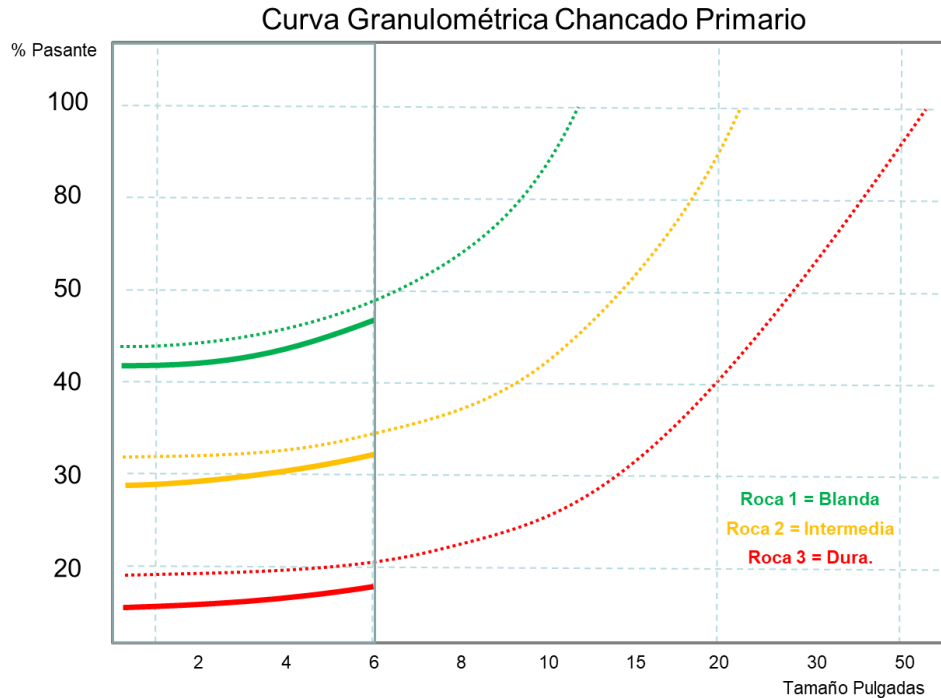


Figura 11.- Ejemplo curvas granulométricas ajustadas desde el proceso de Tronadura a Chancado primario, según tipo de roca.

Fuente: Compañía Minera 2, Chile

En resumen, en las etapas de chancado, nuevamente lo que se busca es reducir el tamaño de los materiales utilizando un esfuerzo que se puede medir en energía consumida por unidad de tiempo, intentando cumplir con dos objetivos centrales, el primero dar continuidad de proceso aguas abajo y segundo con la calidad de material que se requiere.

3.2.5.- Molienda: La molienda es un proceso de conminución que generalmente se trabaja incorporando agua, o sea, en húmedo y usualmente realizada en 1 o 2 etapas. El mineral chancado proviene normalmente de las etapas de chancado primario o terciario (con granulometrías del orden de 20 cm o 1 cm) y el producto final requerido variará, según sea la liberación requerida del mineral de que se trate, entre 100 y 300 mm.

La reducción de tamaño se realiza mediante la combinación de los mecanismos de impacto y abrasión. Esta operación se realiza en tubos cilíndricos o cilindro-cónicos rotatorios, llamados molinos rotatorios, caracterizados por su diámetro, D, y su largo, L. En el interior del molino se utiliza una carga de medios de molienda que se mueven libremente y que, por la fuerza centrífuga generada en la rotación del molino, se elevan en la dirección de la rotación y caen por acción de la gravedad.

Los parámetros más relevantes en el proceso de molienda son fracción de llenado del molino, la fracción del volumen del molino ocupado por la carga de medios de molienda en su forma aparente (J), la porosidad de la carga de molienda, o sea, el volumen de huecos dividido por el volumen aparente de la carga (ϵ), la masa de mineral en el interior del molino, constante en el equilibrio, denominado “holdup” (H) y razón largo diámetro del molino (L/D).

Volviendo al concepto de que más interesa, cuanta energía se requiere para lograr la fragmentación deseada, se puede indicar que la energía potencial, E_p , es la energía principal utilizada en moler el mineral, la cual se estima a partir de:

$$E_p = m g h$$

m = masa del medio moledor, g= aceleración de gravedad, h = altura de caída.

En la molienda convencional, generalmente se toma el producto resultante del chancado terciario y se trata mediante un medio moledor, que comúnmente son barras de acero, para luego enviarlo a cajones de descarga y luego a etapas de molienda fina o directamente de clasificación. En la molienda SAG, se reemplazan las barras por otro medio moledor, normalmente bolas acero y el propio mineral como medio moledos, y además generalmente no son necesarias las etapas de chancado secundario y terciario, dado que el mineral proveniente de las etapas de tronadura y chancado presentan una curva granulométrica muy favorable.

Cabe destacar que la molienda SAG comúnmente va asociada a un proceso de chancado denominado “pebbles” que se utiliza para tratar las partes de mineral que por su dureza son diferentes al resto. A finalizar la molienda SAG generalmente se pasa al proceso de clasificación con hidrociclones, los cuales envían a reproceso de molienda de bolas el “underflow”.

En el caso de la molienda SAG, la ecuación de Bond no es aplicable a este tipo de molienda y su validez se limita sólo a la molienda convencional, por lo cual al analizar la mecánica del movimiento de un molino SAG y su carga, es posible deducir una ecuación que relaciona la potencia consumida por un molino y el tamaño del mismo.

$$P = 2.208 D^{2.5} L \rho_{apc} (N/N_c)$$

P = Potencia (kW), D = Diametro Molino (m), L = Largo Molino (m), ρ = Densidad (t/m^3), N_c = Velocidad angular critica (rpm), N = Velocidad operación (rpm).

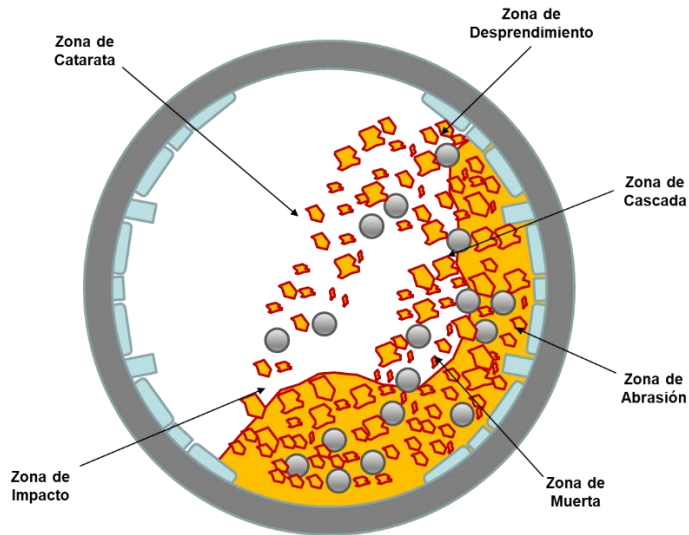


Figura 12.- Zonas de fragmentación o conminución al interior de Molino SAG.

Fuente: Diseño del Proceso Molino SAG – Repositorio U. de Chile

Finalmente el proceso de molienda entrega el elemento valioso liberado, con tamaño de partículas a escala de micrones, también bajo una curva de distribución granulométrica que es difícil de representar, pero con rangos de clasificación que indican que no todo el mineral molido o procesado podrá ser recuperado en las etapas de concentración.

- Minerales con grado de no liberados (5-10%)
- Minerales con grado de liberados ultra finos, de difícil concentración (5-10%)
- Minerales con grado de liberados aptos para ser concentrados o recuperados (80-90%)



Figura 13.- Diagrama proceso operación Mina & Planta, donde “E” corresponde a la energía requerida para las etapas de conminución.

Fuente: Elaboración Propia

3.3.- Estado del arte.

Entendemos el estado del arte como lo último, lo mejor o lo más avanzado que ese está haciendo en la industria respecto de un proceso, respecto de la investigación y la acción. En ese sentido, volveremos a revisar las etapas operativas más relevantes de negocio minero, ahora mirado desde los últimos avances en cada una de ellas y siempre bajo el concepto de Integración Mina & Planta.

3.3.1.- Caracterización de la Roca y Minerales.

Debemos distinguir para en el proceso de caracterización de rocas hay dos aspectos relevantes, el primero tiene que ver con los test o pruebas geometalúrgicas que se realizan a las rocas, de los cuales finalmente se obtienen los indicadores de trabajo, consumo de energía, moliendabilidad, etc. En este sentido en la industria aún no hay tecnología que reemplace este tipo de test, con lo cuales finalmente se determina cual debiera ser el tratamiento promedio de una roca en un proceso en particular. El segundo aspecto, respecto de la caracterización de roca, tiene que ver con determinar el tamaño in-situ de la roca, para lo cual en la industria si se ha avanzado menormente.

En este segundo aspecto lo clásico es tomar muestras de un sector ya explotado, lo cual generalmente se realiza a través del análisis de los sondajes, mapeo de la pared excavada, etc., a través de técnicas principalmente manuales. Algunas compañías mineras han avanzado en este aspecto y los análisis los realizan con herramientas tecnológicas que permiten de manera remota:

- Realizar fotogrametría y mapeo estructural.
- Crear imágenes en 3D de secciones de la mina tan grandes como 40.000 m² y asignar un espacio preciso información.
- Mapear discontinuidades y designar conjuntos de ellas.
- Análisis y visualización de orientación de estructuras.
- Caracterización del macizo rocoso.

A continuación se presenta una imagen que evidencia el uso de la tecnología y los resultados comparativos de caracterización de roca respecto de métodos tradicionales.

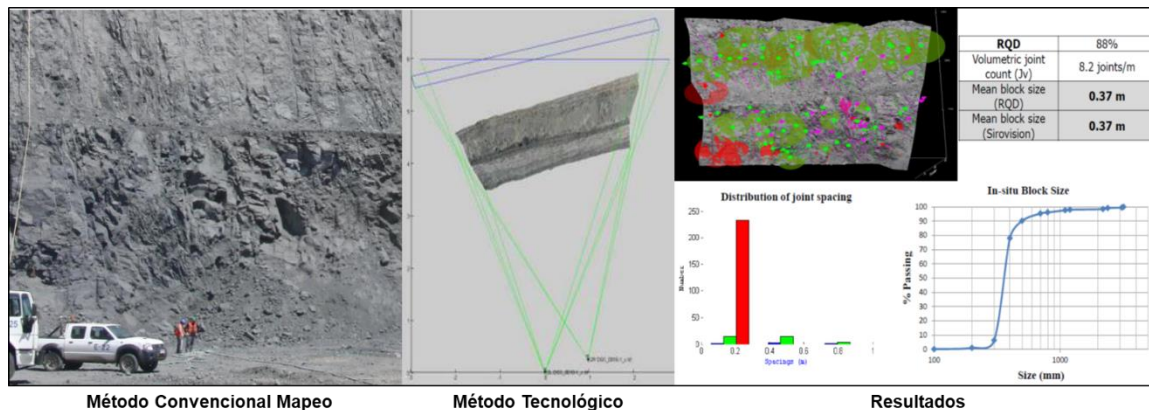


Figura 14.- Comparación de métodos para caracterización de roca.

Fuente: Compañía Minera 2, Chile

Se puede apreciar que la tecnología puede proporcionar información bastante confiable respecto de la caracterización de la roca, en especial del tamaño de la roca in-situ, y con ello estimar más y mejor información para analizar la causa efecto en los procesos aguas abajo.

3.3.2.- Secuencia o estrategia de explotación.

En lo que respecta a la estrategia de explotación, secuencia o plan minero, lo común es que se defina la secuencia a partir del elemento de interés, o sea, se define si el material va a proceso o no, dependiendo de si el contenido del elemento genera beneficios, basados en concepto básico de ley de corte por contenido de cobre por ejemplo.

Los mayores avances en este sentido, tienen que ver con que la secuencia o estrategia de explotación, y con ello la alimentación de minerales al proceso, se determinan a partir de la información que se obtiene de los test que se realizan a la roca, sumado a efecto o aporte que genera la tronadura dependiendo del tipo de roca y sector a explotar, con lo cual se puede determinar a priori un rendimiento o tratamiento instantáneo del proceso de molienda. Este rendimiento o tratamiento instantáneo empírico, inclusive puede ser una variable que al analizarla en conjunto con la cantidad del elemento de interés, cambie la definición de si el material es económicamente rentable y con ello en definitiva si estamos en presencia de mineral o lastre, o también de cuales minerales generan el mayor valor.

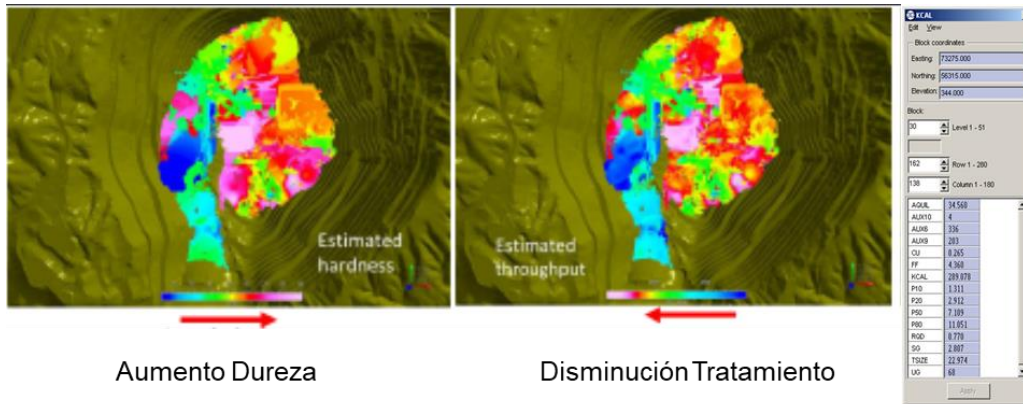


Figura 15.- Ejemplo de modelo de bloques con variables de proceso relacionadas con la conminución y el tratamiento.

Fuente: Compañía Minera 2, Chile

Como la capacidad de tratamiento de una planta concentradora queda establecida una vez que esta se construye, entonces entendemos que esta capacidad de tratamiento es finita, por lo cual cuando la oferta de minerales es mayor a lo que se puede procesar, al incorporar la variable tratamiento de cada tipo de roca vs el contenido de cobre de la misma, se puede encontrar un punto de equilibrio que mejora el estado de resultado del negocio, o sea, una ley de corte diferenciada, lo que rompe con el clásico paradigma en el cual se indica que mientras mas ley tenga el mineral mejor para el negocio, ya que en este caso la definición para el caso del cobre sería “No necesariamente más cobre en la roca, es más cobre en el puerto”.

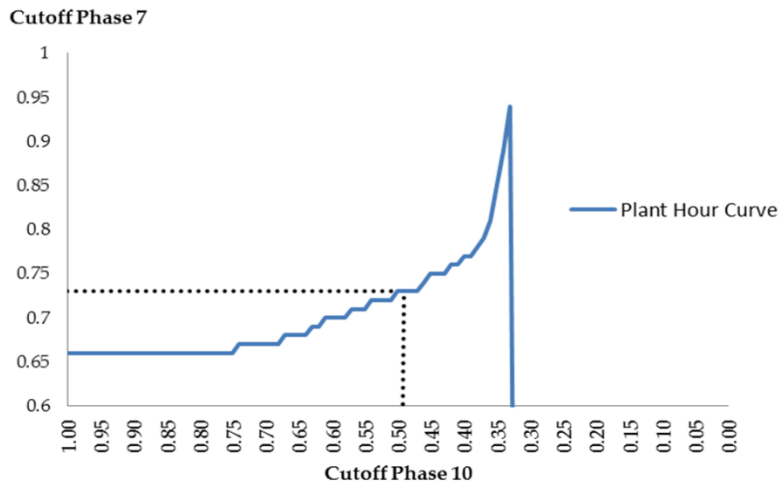


Figura 16.- Determinación de Ley de Corte diferenciada por ley y tratamiento por fase de explotación

Fuente: Compañía Minera 3, Chile.

3.3.3.- Perforación y Tronadura.

En los últimos 30 años la técnica base de perforar pozos y cargarlos con explosivos no ha cambiado mucho, sin embargo los avances van por la línea de la mejora de los tipos de explosivos, los tiempos y secuencia de iniciación para generar mayor fino y microfracturamiento, pero por sobre todo por la capacidad de medir y trazar, desde el punto de vista de la fragmentación, los minerales.

Antiguamente, el resultado de la fragmentación se definía en términos cualitativos, como una tronadura “buena” o “mala” para los procesos, esto solo a juicio de un experto o no, luego a fines de los años 90, se introduce el primer paso tecnológico y se comienza a fotografiar manualmente la tronadura, y luego de un proceso en gabinete, se obtenían los primeros resultados cuantitativos respecto de la calidad de la tronadura, ahora en términos de una curva o distribución granulométrica. A inicios del 2000 la tecnología avanza enormemente y la toma de imágenes puntuales que se realizaba de forma manual, inclusive deteniendo procesos, se comienza a realizar de manera automática, mediante cámaras ubicadas en los equipos de carguío que entregan resultados de granulometría en línea, directamente desde la zona de excavación, o sea, cuantificando el resultado del primer proceso de conminución.

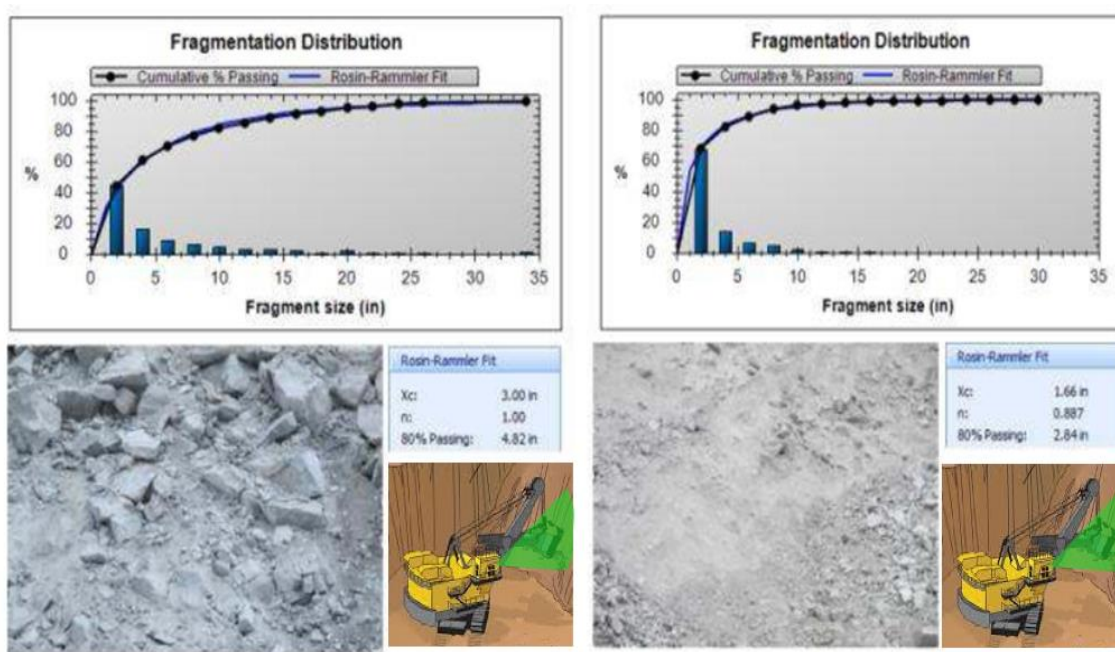


Figura 17.- Comparación de calidad de tronadura a partir de curvas de fragmentación con sistema de cámaras en línea.

Fuente: Compañía Minera 4, México.

Un menor número de compañías mineras, al sistema de monitoreo en línea de la fragmentación de una tronadura, suman la utilización de tecnología relacionada con el posicionamiento, o sea, incluyen trazadores al material que se está cargado para enviar a proceso, con esto son capaces de correlacionar el rendimiento del último proceso (Molienda) con los que están aguas arriba, y a partir de ello generar un ciclo de mejora continua.

3.3.4.- Chancado.

De los procesos involucrados en la integración Mina & Planta, en específico los de chancado primario y secundario, no han tenido una evolución significativa que signifique un cambio en la técnica del proceso. El aporte más bien está relacionado con:

- Al igual que en la tronadura, monitorear en línea la fragmentación después de este proceso y además utilizar antenas que sean capaces de detectar los trazadores.
- Si se tiene la capacidad de estimar previamente los minerales que se van a triturar o “chancar”, se pueden hacer simulaciones respecto de lo que significa ajustar la abertura de descarga del o los equipos y con ello, escalar la curva de fragmentación de manera positiva para los procesos aguas abajo, dado que esta técnica permite disminuir por sobre todo el tamaño del P80 pasante.

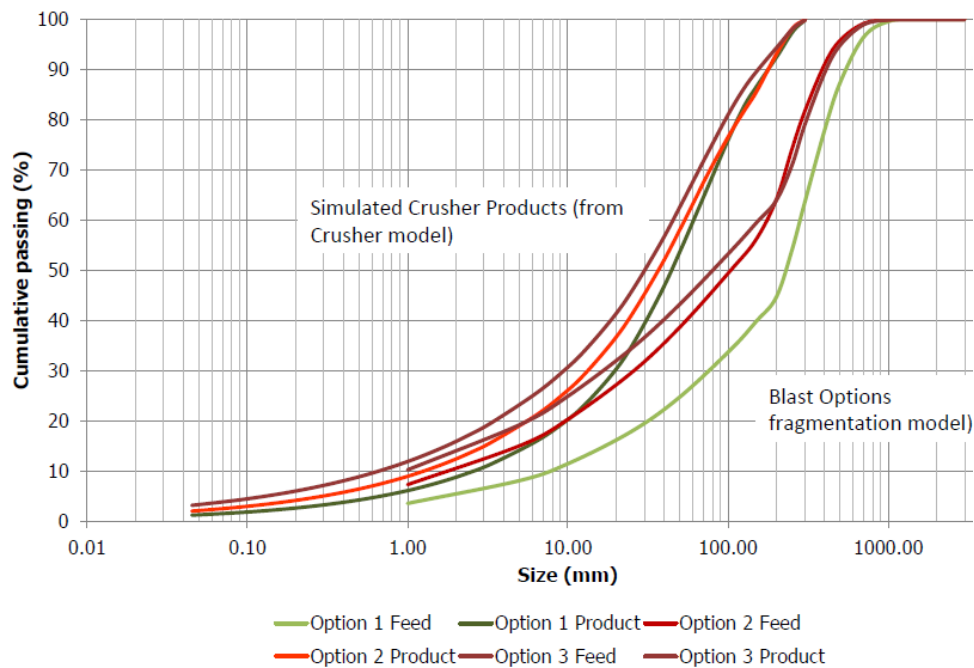


Figura 18.- Simulaciones del producto de chancado primario con diferentes tipos de tronaduras y tamaños de abertura en la salida del equipo.

Fuente: Compañía Minera 2, Chile

3.4.5.- Molienda.

Por último, en lo que respecta al proceso de molienda es donde más intentos o avances se han realizado, esto obviamente porque aquí se evidencia la cantidad de elemento de valor por unidad de tiempo que esta produciendo la compañía.

En la actualidad mucho se habla del internet de las cosas, big data, analítica avanzada, y efectivamente es en este proceso en donde estos conceptos se han implementado con fuerza. Algunas compañías mineras por ejemplo están utilizando *Analítica Avanzada*, ya que permite usar de manera precisa los datos de las distintas fuentes que tengamos para predecir posibles eventos y/o comportamientos que nos ayuden a afrontar cambios en el negocio, con lo cual se puede tomar decisiones preventivas respecto del punto de operación de un subproceso o de un proceso en general. La evidencia real, demuestra que esta técnica permite mejorar el rendimiento de un molino SAG, por ejemplo, entre 2-5 % de su rendimiento efectivo, controlando variables como:

- % Sólidos
- Flujos de Agua
- Granulometría
- Nivel de Llenado.
- Porcentaje de utilización de prechancado.

Cambio punto operación SAG

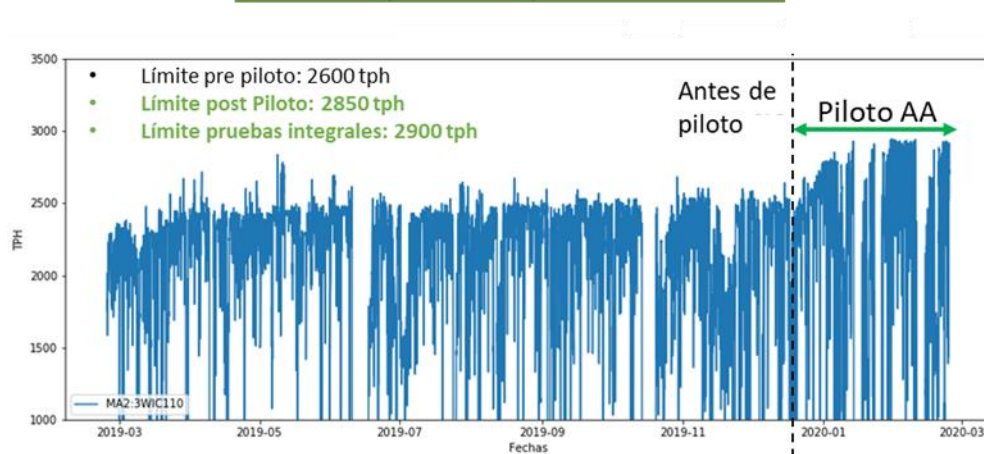


Figura 19.- Simulaciones del producto de chancado primario con diferentes tipos de tronaduras y tamaños de abertura en la salida del equipo.

Fuente: Compañía Minera 3, Chile

4.- Análisis de la problemática y metodología.

Revisada la teoría y los casos prácticos, lo que comúnmente se aprecia son análisis y/o estudios muy detallados respecto de cómo se deben optimizar/mejorar los procesos de conminación, sin embargo buena parte de estos se enfocan en temas específicos del propio proceso más que en una mirada encadenada de ellos. Por otro lado es típico o común que se denomine conminación a los procesos desde el chancado hasta la molienda, y la tronadura no forme parte de esta denominación.

De lo anterior, la problemática a resolver pasa por responder ¿porque el proceso minero no se aborda de manera integral?, como un conjunto de etapas que deben intentar liberar el elemento de interés en el menor de los tiempos y esfuerzos posible.

4.1.- Análisis de la problemática

Para abordar la problemática, la experiencia y la teoría nos indica que la falta de integración de los procesos Mina & Planta tienen que ver con dos aspectos fundamentales, la conducta y la competencia de los individuos que administran estos procesos o un conjunto de ellos.

Respecto de la conducta de los individuos, en ciertas circunstancias estas se ajustan al comportamiento estratégico descrito en el modelo de matemáticas aplicadas denominado Teoría de Juegos, en especial para el caso del *Dilema del Prisionero*. En virtud de que un individuo que administra un proceso o un conjunto ellos, no tenga una recompensa/castigo que evite que tome una decisión con incentivo al desvío o no cooperativa, siempre seleccionará la alternativa que maximiza su propio beneficio y por consecuencia obtendrán todos los jugadores una recompensa menor respecto de haber seleccionado aquella alternativa cooperativa que los hubiese conducido al mayor beneficio conjunto.

En el ambiente minero esta conducta no es aislada, debido a que en ocasiones el tiempo que los líderes permanecen en una posición o una compañía es relativamente breve, lo cual no propicia un trabajo con medidas o acciones de largo plazo, no se logra formar equipo o simplemente no existe el tiempo de maduración suficiente, provocando, quizá sin premeditarlo, conductas no cooperativas o decisiones que no benefician al conjunto.

Entonces, y conociendo la movilidad que existe en el ambiente minero, uno de los aspectos que debe abordar la metodología, es de qué manera se generan incentivos o recompensas para que cada jugador o líder tome decisiones cooperativas que maximicen el resultado del negocio y de cada proceso (jugador), sin importar el tiempo de permanencia en dicha posición o rol.

Para analizar el segundo aspecto, relacionado con la competencia de los individuos, hay que entender que la formación técnica de los profesionales se ha desarrollado por años en un ambiente clásico, que o releva los procesos de minas o bien lo hace en el de plantas, y quizá en el mejor de los casos si la relevancia es similar, sin profundizar de manera clara en como los eslabones de la cadena dependen unos de otros y que aspectos deben ser considerados para que la Integración Mina & Planta se enfoque en producir la mayor cantidad del elemento de interés (Ingresos) con el menor de los esfuerzos (costos).

Para tratar de capturar la oportunidad que ofrece el negocio minero, se propone una metodología orientada a la identificación de pasos que se deben considerar y aplicar al momento de planificar y/o operar los procesos.

4.2.- Metodología.

La manera que se utilizará para lograr resolver la problemática de porque no en todas las compañías mineras se logra implementar correctamente la Integración de Minas y Plantas, será a partir de una serie de pasos o etapas las cuales se describen a continuación:

Los pasos que permitirán responder a las interrogantes y apuntar en cumplir con los objetivos son:

- Etapa 1: Realizar un mapeo del proceso que permita identificar como en la actualidad las empresas mineras abordan la Integración Mina & Planta. (*Mapeo del Proceso-Modelo Base*)
- Etapa 2: Cuantificar y clarificar el problema, respecto de etapas/partes que podrían estar ausentes en modelo base. (*Mejoramiento del Modelo Base*).
- Etapa 3: Revisar si el nuevo modelo mejorado satisface o resuelve las interrogantes. (*Redefinición del Modelo*).
- Etapa 4: Diseño de soluciones o el producto, que es la metodología para la implementación del modelo redefinido. (*Producto o Metodología*).
- Etapa 5: Análisis o justificación económica respecto de la implementación de la metodología. (*Evolución Económica y Caso Practico*)

5.- Desarrollo.

A continuación se describen una serie de etapas que darán forma a la metodología para la integración de los procesos Mina & Planta.

5.1.- Modelo Base (Etapa 1)

Revisados el marco conceptual, el estado del arte o casos prácticos, el análisis de la problemática y las etapas que permitirán construir una metodología, elaboraremos un modelo o esquema que intenta representar como en la actualidad la mayoría de las empresas mineras tienen encadenado o integrado el proceso Mina & Planta, desde el punto de vista de la conminución o fragmentación, y sin considerar los aspectos relacionado con la disponibilidad del sistema o su utilización. En resumen, este esquema apunta a una mirada relacionada con el rendimiento efectivo en función de la eficiencia de conminución de cada proceso unitario, al cual definiremos como modelo base.

A continuación se describen las etapas más comúnmente utilizadas, su relación con otras etapas y la causa efecto aguas abajo.

Caracterización de la Roca (Geología): En la mayoría de los procesos lo que se acostumbra es generar una clasificación por tipo de roca o unidad geológica (UG), la que normalmente tiene que ver con el periodo o edad de formación, y su vez contiene información específica de las características principales de esa unidad. Desde este punto de partida se obtiene información relevante para las siguientes etapas como son:

- Nombre de la Unidad Geológica.
- Contenido del elemento de interés.
- Recuperación metalurgia.
- Grado de Dureza.
- Nivel de Fracturamiento.
- Índice de Trabajo.
- Abrasividad.
- Índices de Molienda.
- Etc.

Toda esta información es la base con que las distintas etapas o áreas construyen sus propios modelos, o dicho de otra manera, son la base de la pirámide desde donde se construye la planificación y operación minera.

Planificación Minera: En esta etapa, comúnmente se define que material es económicamente viable para ser procesado y cual no debe serlo, esto principalmente base a las variables relacionadas con el contenido del elemento de interés y la recuperación empírica que este tiene en función a los ensayos metalúrgicos realizados con las distintas unidades geológicas y especies mineralógicas.

Perforación y Tronadura: Con la información de las unidades geológicas y sus características principales, sumado a si el material tiene como destino el proceso planta o

bien un depósito de estéril, en esta etapa se define la mejor técnica que permita entregar, en la mayoría de los casos, el mineral más fino posible a los procesos aguas abajo, lo cual se representa mediante una curva granulométrica, que se obtiene generalmente a partir de fotografías puntuales o esporádicas del material tronado.

Chancado: Comúnmente se le denomina la primera etapa de conminución, lo cual en estricto rigor es un error, ya que dada la definición de conminución:

“Este término en su etimología procede del latín «commīnuere» compuesto por el prefijo «con» de «cum» y «mīnuere» que quiere decir minorar o reducir y del sufijo «ción» que indica efecto, hecho o acción de”

Entonces se desprende que la etapa de chancado no es la primera etapa de conminución, y podemos entender que su efectividad depende de etapas anteriores en donde la roca ya ha reducido de tamaño. Lo más común es que el aspecto relacionado con los elementos o material de sobre tamaño que se deben procesar en la etapa de chancado, son la variable más relevante a considerar, dado que requieren una gran cantidad de energía y tiempo para lograr ser “chancados” o tratados en esta etapa, lo cual de alguna forma puede poner en riesgo la confiabilidad mecánica del equipo, generan un costo mayor de procesamiento y lo más crítico, podrían generar pérdidas de continuidad en la alimentación de los procesos aguas abajo, esto porque en las plantas los stock, tolvas, o almacenamiento tienen una limitada capacidad dada la configuración o layout del proceso planta.

El objetivo primordial de esta etapa, es entregar la cantidad de mineral suficiente para asegurar la continuidad de los procesos aguas abajo, con una calidad relacionada con el P80 o tamaño promedio de alimentación a molienda, lo cual la mayoría de las veces se mide a través de sistemas de monitoreo en línea que nos permiten obtener curvas granulométricas a cada instante.

Molienda: Lo habitual es que en esta etapa se determine si la gestión de Integración de Minas & Plantas es la correcta o no, dado que el tratamiento o molienda es parte de la ecuación fundamental del beneficio del negocio que esperamos obtener. Aquí confluyen todos los aspectos relevantes de las etapas previas, desde la caracterización geológica (tipo de roca a moler), planificación (cantidad del elemento de interés), Tronadura (% -1 Pulgada o cantidad de mineral fino) y Chancado (granulometría promedio de alimentación).

En este proceso se conminuirá la roca hasta lograr la liberación requerida a un máximo de rendimiento, para obtener la recuperación óptimo-económica del elemento, conociendo las restricciones de los procesos aguas abajo, como por ejemplo la capacidad de transporte, filtrado u otras.

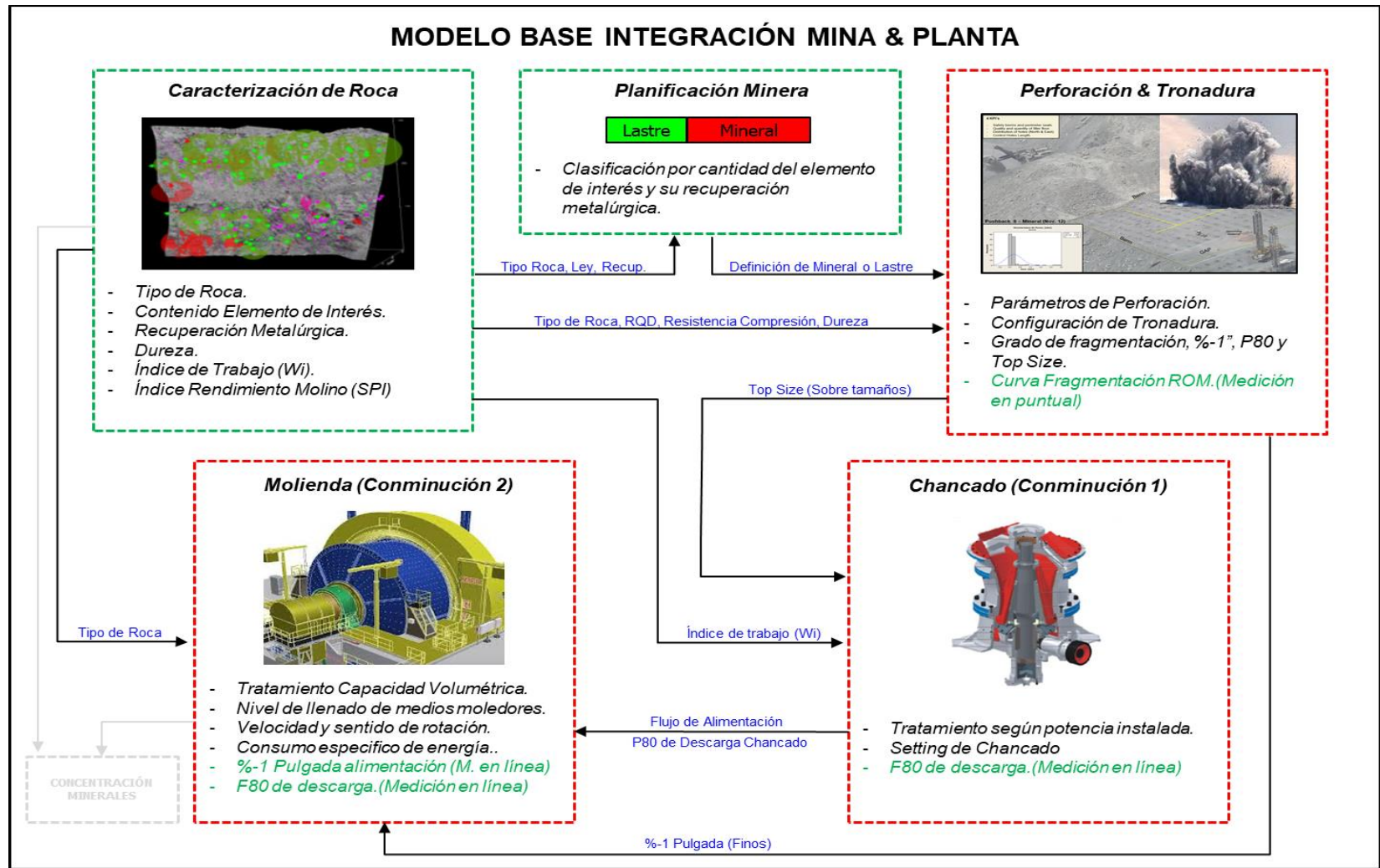


Figura 20.- Modelo Base para la Integración Mina & Planta, en Función de la Conminución de Minerales.

Fuente: Elaboración Propia

5.2.- “Mejoramiento” Modelo Base (Etapa 2)

El modelo base con se opera de manera integrada en buena parte de las Minas & Plantas, es de toda lógica y con el correr de los años, especialmente dada la revolución tecnológica y digital, ha sumado componentes que ha permitido hacer mejoras al interior de los procesos. Sin embargo no tanto se ha avanzado respecto de una mirada global, o sea, que otros componentes o aspectos deben tener cada etapa no solo para la mejora interna del proceso, sino más bien para la mejora de los resultados globales del negocio.

En este punto, volveremos a repasar las etapas, pero incluiremos aquellos aspectos que deben ser considerados para obtener un mejor modelo en su conjunto, recordando que “no siempre el óptimo de todos los procesos, es necesariamente el óptimo del negocio”.

Caracterización de la Roca: De lo analizado, en esta etapa el modelo requiere de al menos dos aspectos que se deben incorporar al momento de caracteriza la roca o unidades geológicas:

- Generar una familia de unidades geológicas en función de comportamiento en los procesos de conminución, o sea, un **lenguaje común para todas las etapas**, similar a lo descrito en el siguiente ejemplo.

Familias de Rocas en Función de Capacidad de Conminución								
Unidad Geológica	Litología	Fracturamiento	Resistencia (MPa)	Wi	BAI	CEE	%<1"	Familia
10	Tobas	Intactas	240	14,5	0,27	10,1	30	Ultraduras
10	Tobas	Fracturadas	220	14,5	0,27	8,9	37	Duras
10	Tobas	Cizallada	220	14,6	0,31	7,5	45	Intermedias
20	Brecha K-F	Intactas	140	15,0	0,46	9,4	30	Duras
20	Brecha K-F	Fracturadas	120	15,0	0,46	8,3	37	Intermedias
20	Brecha K-F	Cizallada	100	15,0	0,46	7,1	45	Ultrablanda
30	Metandesita	Intactas	100	13,9	0,22	8,7	30	Duras
30	Metandesita	Fracturadas	80	13,9	0,22	7,8	37	Blanda
30	Metandesita	Cizallada	60	13,9	0,22	6,7	45	Ultrablanda
40	Brecha Magnetica	Intactas	100	13,5	0,24	8,1	30	Intermedias
40	Brecha Magnetica	Fracturadas	80	13,5	0,24	7,2	37	Blanda
40	Brecha Magnetica	Cizallada	60	13,5	0,24	6,1	45	Ultrablanda

Tabla 4.- Ejemplo Familia Litológica en Función de la Conminución Aguas Abajo.

Fuente: Compañía Minera 2, Chile

- Sostener una campaña de pilotajes periódicos o en función de la explotación de la Mina, dado que los datos o información geológica originales con que se determinaron las capacidades que de debían instalar para operar, pueden variar en el tiempo, y con ello las expectativas o resultados de negocio esperados.

Planificación Minera: En esta etapa el modelo requiere la incorporación de un aspecto fundamental, que es diferenciar las zonas de contorno o cuidado de talud de las de producción, en virtud de que los objetivos son muy distintos en cada zona. Los resultados

que se pueden obtener en términos de conminución, suelen ser diferentes para un mismo tipo de roca.

Como se vio en los antecedentes generales o marco conceptual, de todo el mineral que se envían a proceso, debe existir una proporción que indique claramente cuanto de este mineral proviene de la zona de contorno y cuanto de la zona de producción, lo cual permitirá establecer las características granulométricas de alimentación de manera proporcionada a los procesos aguas abajo, inclusive cuantificar a través de un periodo de tiempo, las características geológicas y granulometrías de manera planificada.

Plan Semanal de Alimentación Mineral a Planta												
Día	Fecha	Fase	Poligono	Zona	Equipo	Cantidad (Ton)	Tipo Rx	Wi	CEE	PH	P80	%-1"
1	10-08-2018	8	100-1	Contorno	Pala 20	38.000	Blanda	13,35	5,58	7,7	10,5	32
1	10-08-2018	8	100-2	Producción	Pala 21	60.000	Blanda	13,14	5,59	7,7	9,7	39
2	11-08-2018	8	100-1	Contorno	Pala 20	38.000	Blanda	13,05	5,58	7,7	10,5	32
2	11-08-2018	8	100-2	Producción	Pala 21	60.000	Blanda	12,98	5,55	7,7	9,4	41
3	12-08-2018	8	100-3	Producción	Pala 20	60.000	Intermedia	14,32	5,83	7,7	9,5	40
3	12-08-2018	8	100-2	Producción	Pala 21	60.000	Blanda	13,01	5,52	7,7	9,5	41
4	13-08-2018	8	100-3	Producción	Pala 20	60.000	Intermedia	14,81	5,78	7,7	9,3	43
4	13-08-2018	8	100-2	Producción	Pala 21	60.000	Blanda	13,05	5,5	7,7	9,2	44
5	14-08-2018	8	100-3	Producción	Pala 20	60.000	Intermedia	14,56	5,75	7,7	9,3	43
5	14-08-2018	8	100-4	Contorno	Pala 21	38.000	Blanda	13,01	5,51	7,5	11,2	30
6	15-08-2018	8	100-3	Producción	Pala 20	60.000	Dura	15,01	5,87	7,7	10,1	32
6	15-08-2018	8	100-4	Contorno	Pala 21	38.000	Blanda	13,25	5,54	7,5	10,5	32
7	16-08-2018	8	100-3	Producción	Pala 20	60.000	Blanda	14,85	5,75	7,7	9,3	41
7	16-08-2018	8	100-4	Contorno	Pala 21	38.000	Blanda	12,98	5,49	7,5	10,5	32

Tabla 4.- Ejemplo Programa Alimentación Planta en Función de las Características de la Roca, Zona de Explotación y Resultados Granulométricos.

Fuente: Compañía Minera 5, Chile

Perforación y Tronadura: Ahora que sabemos que en la caracterización de la roca y en la planificación, existe nueva y mejor información, la pregunta es qué se debe hacer con ella?. Pues bien, considerando que se ha aplicado la mejor Técnica de perforación & Tronadura, lo que procede es:

- Validar a través de un proceso con una garantía de calidad (QA) y control de calidad (QC), la ejecución de esta etapa, en función de que la energía de la tronadura cumpla su objetivo eficientemente.
- Contar con un sistema de monitoreo en línea que permita estimar la fragmentación en todo momento, lo cual generalmente se realiza instalando un sistema que lo permita en los equipos de carguío.

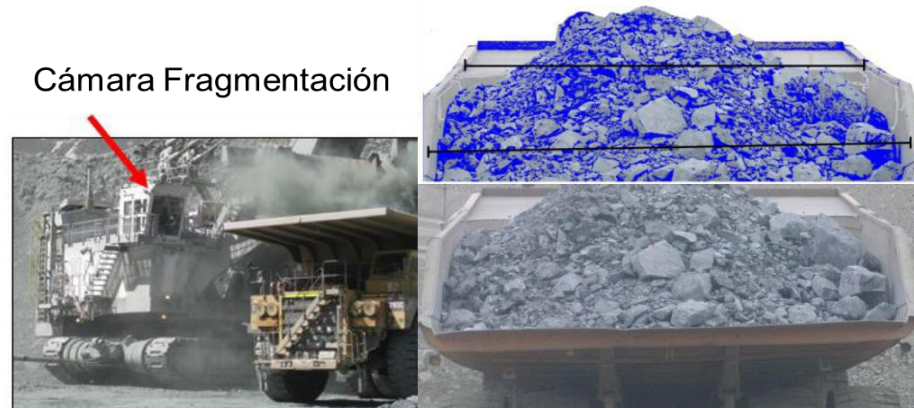


Figura 21.- Sistema Monitoreo en Línea de Fragmentación.

Fuente: Compañía Minera 2, Chile

- Utilizar herramientas como trazadores o “tag” para generar correlaciones entre el mineral procesado aguas abajo, su origen y características, lo cual permite calibrar el modelo y la técnica de tronadura.



Figura 22.- Trazadores, ejemplo Metso Smart Tag.

Fuente: Compañía Minera 2, Chile

- Monitoreo de vibraciones y velocidad de detonación (VOD).
- Determinar forma o disposición del mineral posterior a la tronadura (Muckpile), para contrarrestar con rendimiento de equipos de carguío y desgaste de aceros.

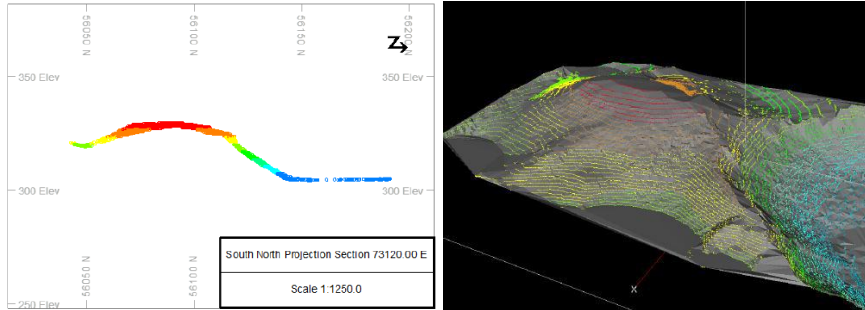


Figura 23.- Forma de la Pila Post Tronadura.

Fuente: Compañía Minera 2, Chile

Carguío y Transporte: A pesar de que se han implementado las mejores técnicas o parámetros de perforación y configuración de la tronadura, es inevitable que un sector de ella presente minerales que no tienen el tamaño adecuado para ser tratados eficientemente en la Etapa de Chancado. Estamos hablando de los sobre tamaños, que deben ser clasificados como un “material no deseado” y debido a ello ser reducidos al tamaño similar al P80 de la tronadura, esto si es que económicamente su contenido en ley les permite generar beneficios producto del proceso de reducción secundaria.

Entonces, en el proceso de carguío y transporte, especialmente en el primero se cumple una doble función, la de asegurar la continuidad de los procesos aguas abajo en función de la cantidad mineral alimentado y también respecto de la calidad de este, entendiendo que también esta etapa debe funcionar como un *sistema de clasificación* que no afecte y mejor aún, mejore los procesos aguas abajo.

Chancado: Ahora que desde la mina el mineral es alimentado con un muy bajo porcentaje de sobre tamaño, la función en esta etapa de conminución es:

- Mantener continuidad o abastecimiento de mineral aguas abajo.
- Monitorear fragmentación del mineral en la salida del chancado o primeras correas de transporte, bajo un sistema en línea, como también con la técnica de “corte de correa”, que permite mantener calibrados los sistemas on-line y a su vez el modelo en general.
- En función de las mejoras en la granulometrías de alimentación, y si el proceso aguas abajo no tiene una mayor demanda, ajustar “setting” descarga del chancado para escalar la curva de fragmentación de manera positiva para los procesos aguas abajo.
- Es común que previo o posterior a la Etapa de Chancado existan stock de mineral suficientes para sostener la continuidad operacional durante los procesos de mantención o fallas operacionales, mantener una forma y tamaño que evite la segregación de granulometrías es fundamental, lo cual puede ser validado a través de un modelo mediante los “trazadores” antes mencionados y topografía de dicho stock.



Figura 24.- Segregación por forma del stock, alimentación directa e indirecta.

Fuente: Compañía Minera 2, Chile

Molienda: Ahora que ya tenemos todos los datos de entrada del mineral alimentado a la molienda, geológico, planificación, mantención y granulometrías, en la etapa de molienda los aspectos más relevantes son los semi empíricos:

- Consumo específico de energía que se obtiene a partir de los pilotajes por unidad geológica y su granulometría post tronadura.
- Modelo de vida de los revestimientos en función del tipo de roca y granulometría.
- Optimización de las variables operacionales relacionadas con la potencia del o los molinos.
- Confiabilidad de los sistemas de alimentación aguas arriba.
- Monitoreo de la granulometría y de “trazadores”, justo antes de la alimentación directa al molino.

El tratamiento entonces podríamos describirlo en función de:

$$TPH = \sum_i \left(\frac{P}{CEE_i} \right) \cdot UG_i + \sum Efectos Operacionales$$

Donde:

P= Potencia del Molino.

CEE= Consumo Específico de Energía para la Roca (i)

UG= Característica de Unidades geológicas (i).

A su vez el consumo específico de energía será función de:

$$CEE = f(UG, \%1'')$$

%1'':= Porcentaje pasante según unidad geológica al menos 1%.

El %1'' se obtiene, como base, a partir de los pilotajes y luego se ajusta en función de las distintas pruebas de tronadura para un mismo tipo de roca, a través del monitoreo el línea de la granulometría en las distintas etapas de los procesos posteriores, con lo cual se puede ir calibrando el modelo y determinando cual es la mejor técnica aguas arriba que genera los mayores beneficios aguas abajo.

Este modelo aplica bajo condiciones ideales de concentración aguas abajo, o sea, que no existan restricciones por capacidad de transporte, filtrado o simplemente por confiabilidad de sistema.

A continuación se presenta un esquema del modelo "mejorado" para la Integración de Minas & Plantas.

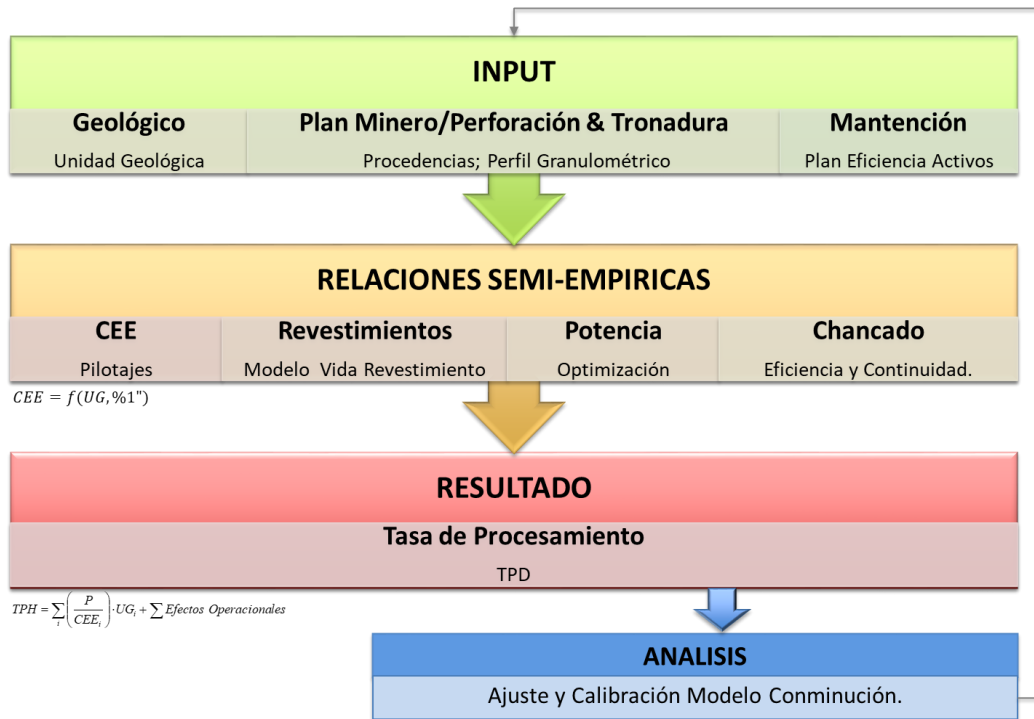


Figura 25.- Esquema del modelo "mejorado" para la Integración de Minas & Plantas.

Fuente: Procemin 2016.

El modelo mejorado presenta las siguientes diferencias respecto del modelo base:

- Pilotajes periódicos que se ejecutan en función de la explotación de la Mina.
- Familia de rocas identificadas que permita utilizar lenguaje común, a partir de una serie de datos técnicos característicos de cada una de ellas.
- El área de planificación no solo determina las cantidad de mineral en función de la ley o contenido del elemento de interés, sino que también el perfil granulométrico de alimentación a Planta por cada unidad geológica y zona de explotación.
- En la Etapa de Perforación & Tronadura debe realizarse un QA/QC de cada proyecto de tronadura, para certificar la calidad del producto.
- La etapa de Carguío y Transporte cumple la función de clasificar los minerales por granulometría, evitando enviar directamente sobre tamaños a los procesos aguas abajo.
- La reducción secundaria es un costo adicional, que puede hacer que una cantidad de mineral cambie de destino, en función a si presenta beneficio después de esta etapa.
- La granulometría de la tronadura debe ser medida con sistemas on-line, utilizando también “trazadores” que permitan analizar los rendimientos de molienda de manera diferenciada. Estos sistemas deben ser calibrados y certificados periódicamente para validar la información y certificar la calidad de cada proceso.
- La etapa de Chancado debe asegurar la continuidad de alimentación, controlando que no se produzca la segregación en stock pile.
- En la etapa de Chancado se debe medir la granulometría on-line y también mediante un sistema de muestreo directo, con la finalidad de calibrar y ajustar las curvas.
- Si los procesos aguas arriba son mejorados, en la etapa de Chancado, continuamente se debe analizar el ajuste de la abertura de salida, ya que esto permite escalar completamente la curva granulométrica.
- En la Etapa de Molienda se mide el esfuerzo de esta y todas las etapas iniciales, lo cual se representa a través del Tratamiento Efectivo como unidad de rendimiento, el cual depende principalmente del tipo de roca y el perfil granulométrico.

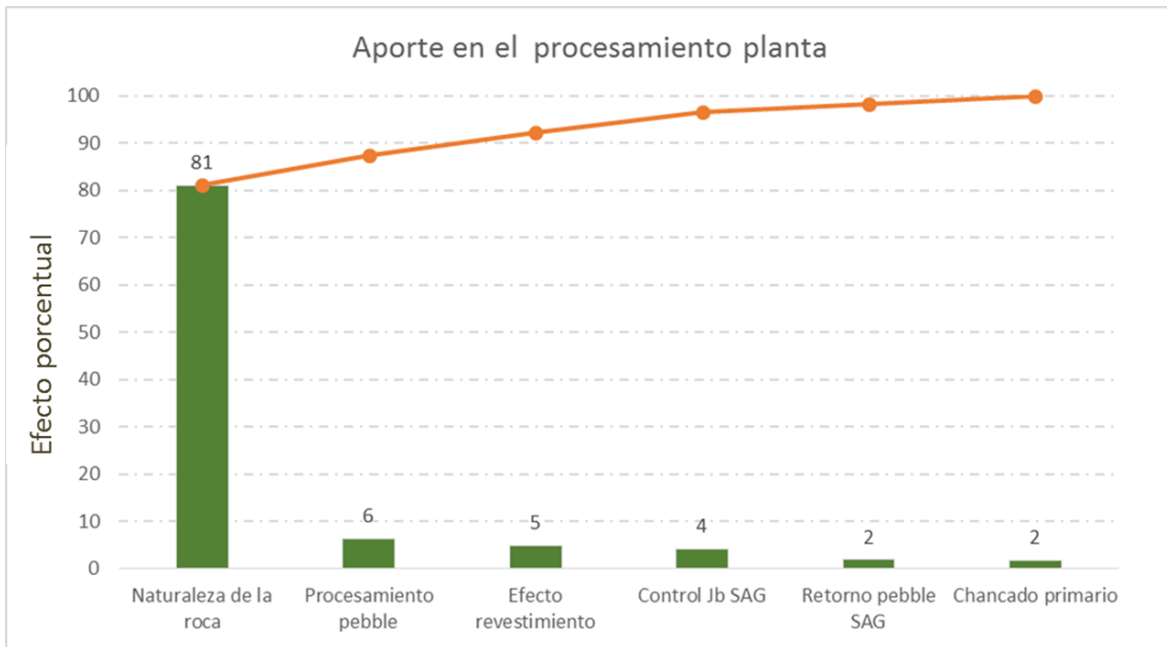


Figura 26.- Ejemplo real del aporte en el procesamiento de Planta. La naturaleza de la roca considera, el tipo de roca y su comportamiento granulométrico.

Fuente: Procemin 2016.

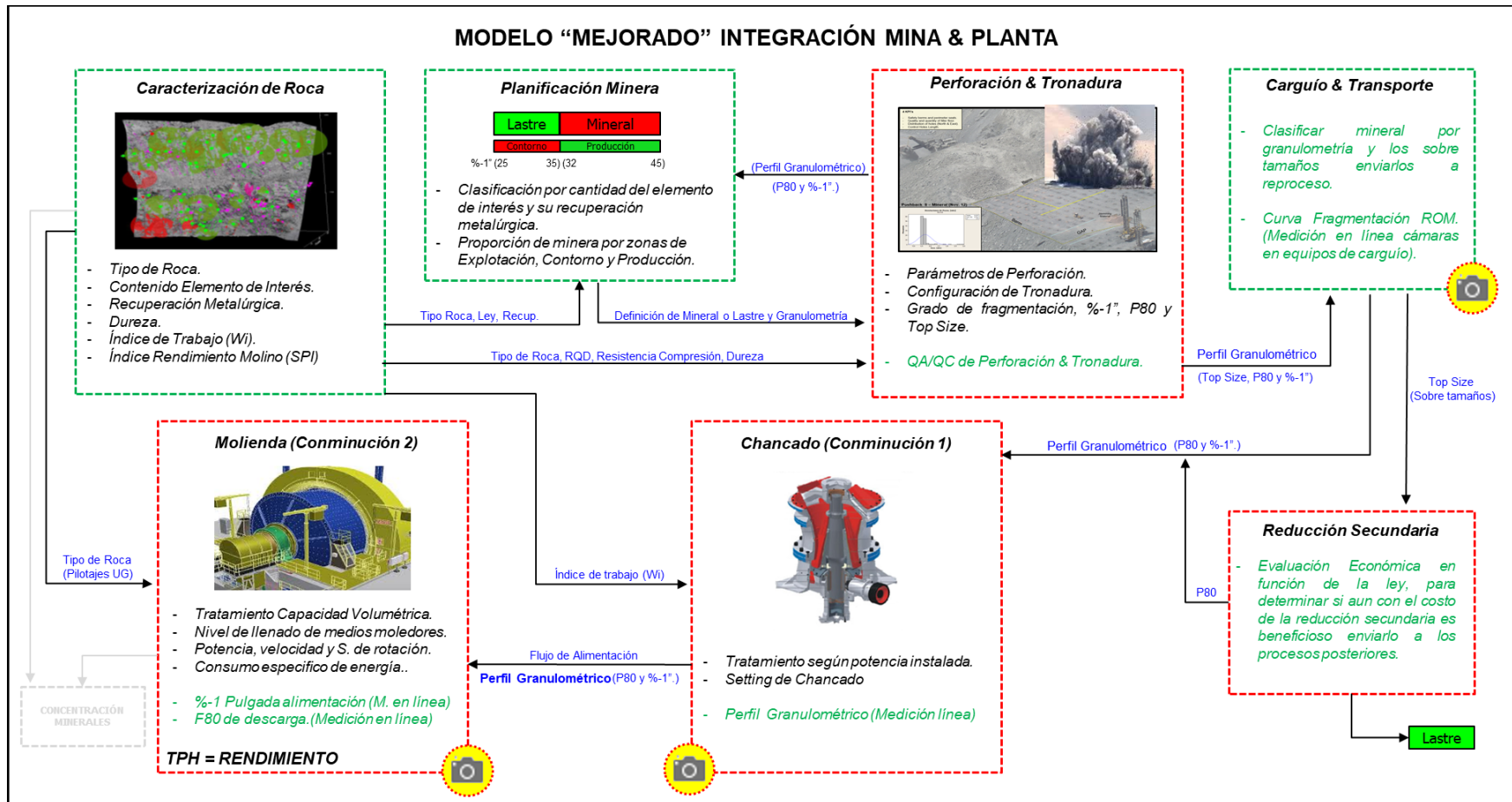


Figura 27.- Modelo Mejorado para la Integración Mina & Planta, en Función de la Conminución de Minerales.

Fuente: Elaboración Propia

5.3.- Redefinición del Modelo.

A partir del “Modelo Base” inicial para la Integración de Minas & Plantas, luego habiéndolo mejorado al punto de que todas las etapas o procesos que intervienen en la generación de resultados se presenten alineadas al fin común, la pregunta sería, este modelo mejorado resuelve o da cuenta de la problemática?.

Recordemos que en el análisis de la problemática identificamos dos causas principales por la cual la Integración Mina & Planta no se produce o se hace de manera incompleta, primero la conducta y segundo la competencia de los individuos que administran estos procesos o un conjunto de ellos. Según se puede apreciar, el Modelo Mejorado responde bien al aspecto relacionado con la competencia de los profesionales, pero no es capaz de solucionar lo referente con la conducta, por lo cual daremos otra mirada al modelo, o sea, lo redefiniremos desde el punto de vista de la conducta de los individuos que administran o lideran los procesos.

Para abordar los aspectos relacionados con la conducta, específicamente el incentivo al desvío o desalineamiento en el liderazgo estratégico que los individuos pudieran tender a desarrollar, lo que significa privilegiar el beneficio particular más que soportar la visión de la compañía, del análisis de los casos estudiados, se aprecia que la mejor manera de viabilizar la integración de mina planta debe estar en función a:

- Definir un “sponsor” o patrocinador general, el que normalmente debe ser el líder máximo o al menos transversal del sitio u operación.
- A partir de diagnóstico inicial o línea base, establecer con claridad una lista de acciones tendiente a llevar a la operación al siguiente nivel o niveles.
- Establecer los KPI’S de cada proceso que apalancan el resultado global o asegura la integración.
- Valorizar económicamente el aporte de la integración en función a los resultados globales del negocio a partir de la variación de las pruebas, ensayos e iteraciones que los distintos procesos particulares realizan para mejorar el desempeño global.
- Utilizar una metodología para la planificación, control y seguimiento, que genere el aprendizaje y mejora continua.

Entonces nuestro modelo mejorado pasa a ser un modelo redefinido y completo, que da cuenta de la solución a la problemática, tal como se aprecia en la siguiente figura.

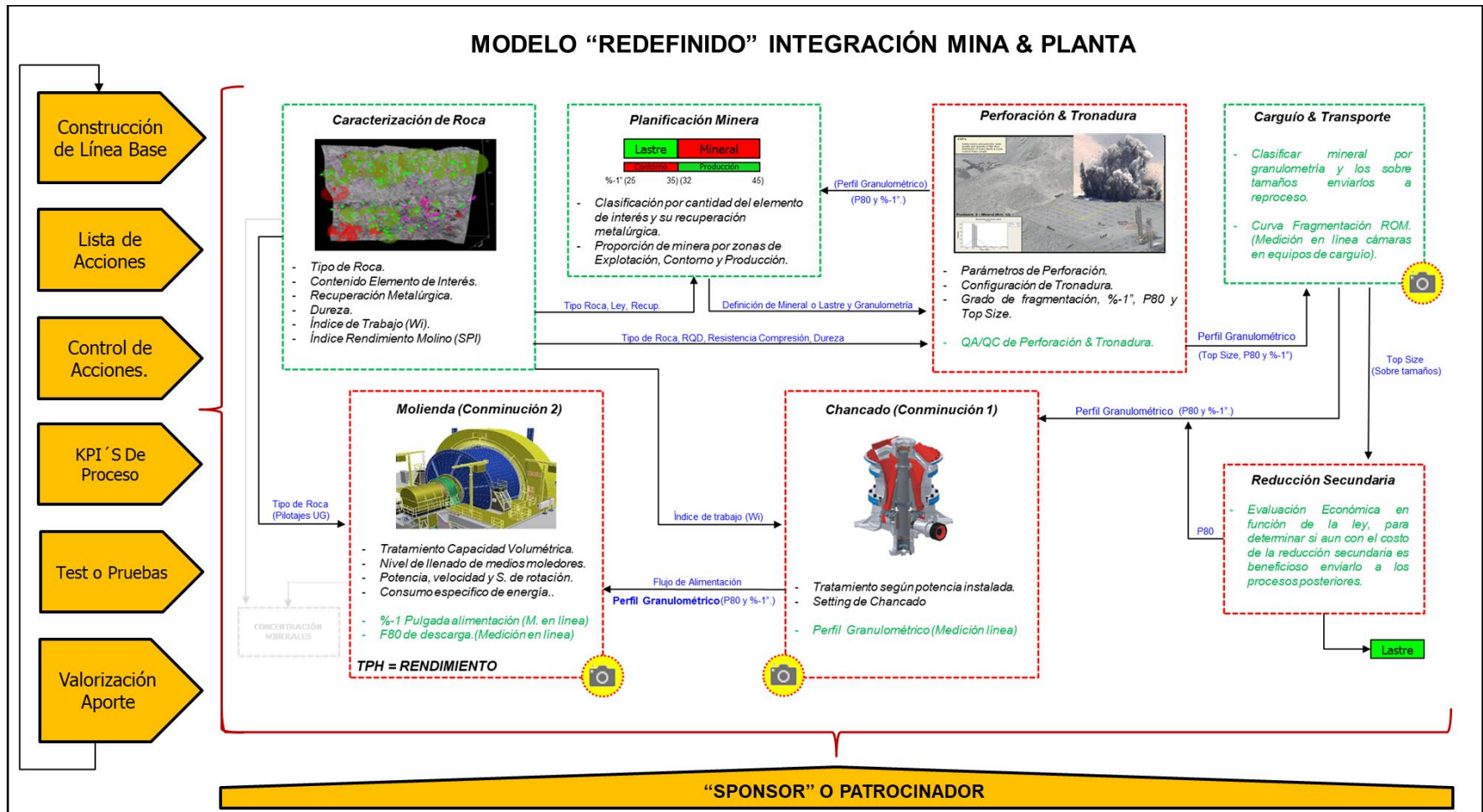


Figura 28.- Modelo Redefinido para la Integración Mina & Planta.

Fuente: Elaboración Propia.

6.- Producto o Metodología

Vista la teoría y las distintas experiencias en donde se ha aplicado, entonces la metodología o guía metodológica será una serie de pasos o etapas que permitirán desarrollar e implementar de manera simple la Integración Mina & Planta en las operaciones mineras, independiente de las singularidades que cada una de ellas presentan, siempre sobre la base de que la gestión para generar valor se apalanca a partir de maximizar el tratamiento y con ello obtener más elemento comercializable (Ingresos) con el menor de los esfuerzos (costos).

Entonces la metodología será la de aplicar pasos o etapas para la implementación, a la cual llamaremos “*7 Pasos para la Integración Mina & Planta*”, los cuales se enuncian a continuación:

Paso 1: Definir un “Sponsor”o Patrocinador.

Paso 2: Generar un modelo o línea base de cada proceso y de su conjunto, lo que también de los sistemas de medición y control relacionados.

Paso 3: Identificar una lista de acciones que permita cerrar brechas respecto del “Modelo Refinado”.

Paso 4: Definir KPI’s o variables de control de cada proceso intervienen o deben ser controladas para generar valor.

Paso 5: Realizar pruebas o “Test” sensibilizado las variables principales de cada proceso.

Paso 6: Realizar análisis sistemáticos de las pruebas o “test”, revisando el efecto a partir de las variables principales de cada proceso y estimar el aporte o generación de valor al negocio.

Paso 7: Generar, documentar e implementar un estándar operacional, el cual puede o no modificar la línea base y las variables de control.

6.1.- Documentación de la metodología.

A continuación explicaremos un poco más en detalle que significa cada paso, como aplicarlo y la relevancia para lograr la integración, haciendo referencia a lo expuesto en los capítulos anteriores de este estudio.

Paso 1 - Definir un “Sponsor” o Patrocinador: Un líder y vele por que la implementación se realice siempre privilegiando el propósito general de la compañía por sobre aspectos particulares de cada proceso, por lo cual se recomienda un líder que sea transversal a la organización y con jerarquía suficiente para guiar respecto del camino y acciones a seguir.

Paso 2 - Generar línea base de cada proceso: Vistas las mejores experiencias en distintas compañía mineras o en base al “Modelo Refinado” propuesto, se debe hacer un levantamiento del estado de cada proceso, identificando que partes o etapas faltan por

implementar. Esto pueden ser etapas de análisis, de planificación, de diseño, control, trazabilidad, automatización, etc, todo aquello que podría contribuir en identificar las causas de un mayor o menor tratamiento, respecto de las variables aguas arriba.

Paso 3 - Identificar lista de acciones para cerrar brechas en procesos: De las brechas que se aprecien en la línea base, se debe construir un listado de acciones tendientes a mejorar el estado de los procesos, con especial atención a todo aquello que permita estimar la granulometría en cada una de las etapas de manera sistemática, idealmente mediante sistemas en línea. También en lo referente al estado de los equipos, instalaciones, inclusive en lo relacionado a los roles que cumple la supervisión o los líderes de cada proceso.

Paso 4 - Definir KPI's o Variables de Control: Construir una red de KPI's que den cuenta de la generación global de valor al negocio, por sobre los posibles intereses particulares. Obviamente el centro de estos KPI's o variables de control serán las relacionadas con la granulometría y los esfuerzos que se realizan para conseguir el mejor producto de cada proceso, pensando en los siguientes o aguas abajo.

Paso 5 - Realizar "Test" o Pruebas: A diferencia de otros negocios, el minero basa su trabajo en obtener el elemento de valor a partir de una materia prima no renovable y no homogénea, por lo cual siempre deberemos trabajar con una técnica base, sin embargo esta deberá ser sometida constantemente a estudios o revisión de los parámetros, debido a que el comportamiento de las rocas y minerales son variables en el tiempo y no se pueden estimar con exactitud. Entonces la única manera es realizar constantemente test o pruebas para conocer más sobre el comportamiento y con ello mejorar la técnica de operación.

Paso 6 - Análisis de los "Test" o Pruebas y su generación de Valor: Luego de realizadas las pruebas o "Test" de conminución, a partir del cambio de las variables y técnica en los procesos, se debe analizar o valorizar los efectos en el tratamiento y el resto de los procesos, una especie de caso de negocio que valore el esfuerzo realizado en los procesos vs el resultado global.

Paso 7 - Estándar Operacional y Modificación de Línea Base: Si un cambio en la técnica resulta favorable y se avanza en la generación de valor, esta nueva técnica deberá ser parte del estándar de trabajo en el área en donde se ha realizado la modificación, identificando también que otras variables de otros procesos ocurriendo para generar dicha condición. A partir de esta mejora, se eleva el nivel y se construye una nueva línea base o simplemente se avanza un peldaño en la mejora continua de la Integración de Minas & Plantas.

6.2.- Esquema de la Metodología

A continuación un esquema de la metodología.



Figura 29.- Esquema de la metodología de Integración Mina & Planta.

Fuente: Elaboración Propia.

7.0.- Justificación económica y sensibilidad.

Todo lo anteriormente expuesto no tiene validez si no se demuestra económicamente que la Integración de Mina & Planta genera beneficios o agrega valor para el negocio. En este sentido, se presenta una serie de análisis económicos, el primero de ellos un caso teórico y el resto casos reales de la industria.

7.1.- Caso Teórico.

Supondremos que tenemos un yacimiento de minerales sulfurados de cobre, que se encuentra a menos de 100 kilómetros de la costa y que producirá concentrado de cobre. Se han descubierto en el reservas por 800 millones de toneladas con ley de 0.62%, que al ser convertidas en recursos se estima serán alrededor de 560 millones de toneladas con ley 0.81%.

YACIMIENTO	Roca (Mton)	Ley Cu (%)
Reserva Sulfuro	800	0,62
Recursos Sulfuros	560	0,81
Lastre Total	1400	
Total Material	1960	
Recuperacion Metalurgica	88%	

Tabla 5.- Información del Yacimiento

Fuente: Elaboración Propia.

En las etapas previas a la puesta en marcha y operación, se ha determinado que la planta concentradora tendrá un tratamiento diario de 76.700 toneladas por día, con una recuperación de cobre del 88%, todo esto a partir de las pruebas pilotos o pilotajes obtenidos de los sondeos.

TRATAMIENTO	KTPD	MTPY
Tasa Concentradora	76,7	28
Periodos	20,0	
Tasa Mina	268	98

Tabla 6.- Información Concentradora y Vida del Proyecto

Fuente: Elaboración Propia.

Las orientaciones comerciales y los estudios de ingeniería han determinado que los indicadores económicos principales para la evaluación del proyecto son los siguientes, además la inversión total que alcanzará el proyecto será de 3800 millones de dólares americanos.

INDICADORES ECONÓMICOS		
Costo Mina	2,0	US\$/ton
Costo Planta	7,0	US\$/ton
Costo G&A	1,5	US\$/ton
Precio Cobre	2,5	US\$/Lb. Cu
Ley de Corte	0,22%	%
Tasa de Descuento	10	%

Tabla 7.- Indicadores Económicos.

Fuente: Elaboración Propia.

A partir de la información anterior se obtiene un flujo de caja simplificado, solo con la finalidad de obtener una base de comparación, la que indica que el proyecto producirá casi 4 millones de toneladas de cobre fino, equivalentes a 8.800 millones de libras de cobre durante sus 20 años de operación, por lo cual el proyecto obtendría un valor presente neto de 1.649 millones de dólares americanos.

ITEM	Unidad	INVERSIÓN Periodo 0	OPERACIÓN											Total	
			Periodo 1	Periodo 2	Periodo 3	Periodo 4	Periodo 5	Periodo 15	Periodo 16	Periodo 17	Periodo 18	Periodo 19	Periodo 20		
Mina Lastre	Mton		74	74	74	74	74	74	74	74	74	74	74	0,0	1400,0
Mina Sulfuro	Mton		28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	560,0
Ley Sulfuro Cu	%		0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81
Mov. Total Mina	Mton		102	102	102	102	102	102	102	102	102	102	102	28	1960,0
Producción Fino Mina	Kton		227	227	227	227	227	227	227	227	227	227	227	227	4539
Tratamiento Planta	Mton		28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	560,0
Ley Mineral	%		0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81
Recuperación	%		88	88	88	88	88	88	88	88	88	88	88	88	88
Producción Cobre	Kton		200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	3.994
Producción Cobre	MLb		440	440	440	440	440	440	440	440	440	440	440	440	8.806
Ingresos Venta	MUS\$		1.101	1.101	1.101	1.101	1.101	1.101	1.101	1.101	1.101	1.101	1.101	1.101	22.015
Gasto Mina	MUS\$		203	203	203	203	203	203	203	203	203	203	203	203	4.067
Gasto Planta	MUS\$		196	196	196	196	196	196	196	196	196	196	196	196	3.920
Gasto G&A	MUS\$		42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	840
Gasto Total	MUS\$		441	441	441	441	441	441	441	441	441	441	441	441	8.827
Inversión	MUS\$	3800													
Flujo de Caja	MUS\$	-3800	659	659	659	659	659	659	659	659	659	659	659	659	9.388
Valor Presente Neto	MUS\$	\$1.649													

Tabla 8.- Evaluación económica caso base.

Fuente: Elaboración Propia.

Conocidas las distintas iniciativas en donde las compañías mineras han decidido utilizar la Integración de Mina & Planta como filosofía de operación, se estima que el implementarla significaría aumentar los costos de mina en un +10%, por conceptos de mayor requerimiento de perforación y tipos de explosivos avanzados tendientes a aumentar el porcentaje bajo una pulgada del mineral alimentado a la planta, lo que se traduciría en un 5% más de tratamiento y con ello una disminución del -10% en el costo de tratamiento, relacionado con el escalamiento en el consumo de aceros y energía eléctrica.

Por otro lado, también se ha definido que el costo general y de administración aumentará un +7%, producto de la utilización de sistemas de monitoreo de fragmentación en línea, trazabilidad de mineral, implementación de analítica avanzada y otros gastos asociados. Este aumento en el costo es el reflejo de mantener el sistema a través del tiempo, dado que también en la inversión inicial del primer año, también se han considerado +10 millones de dólares adicionales por la compra de sistemas y equipos.

A partir de la variación de los costos de operación es posible determinar una nueva ley de corte, lo que se traduce en más mineral disponible con una menor ley media.

YACIMIENTO	Roca (Mton)	Ley Cu (%)		
Reserva Sulfuro	800	0,62		
Recursos Sulfuros	584	0,80	4% ↑	-2% ↓
Lastre Total	1460		4% ↑	
Total Material	2044			
Recuperacion Metalurgica	88%			

TRATAMIENTO	KTPD	MTPY		
Tasa Concentradora	80,5	29	5% ↑	
Periodos	19,9		-1% ↓	
Tasa Mina	282	103		

INDICADORES ECONÓMICOS				
Costo Mina	2,2	US\$/ton	10% ↑	
Costo Planta	6,3	US\$/ton	-10% ↓	
Costo G&A	1,6	US\$/ton	7% ↑	
Precio Cobre	2,5	US\$/Lb. Cu		
Ley de Corte	0,21%	%	-4% ↓	
Tasa de Descuento	10	%		

Figura 30.- Variación de los indicadores principales del proyecto, producto de la implementación de la Integración Mina & Planta.

Fuente: Elaboración Propia.

En función de estas nuevas variables de entrada, se ha sensibilizado el análisis económico base, y con él se han modificado los resultados más relevantes del proyecto, el cual ahora producirá 4.1 millones de toneladas de cobre fino, o sea, +107 mil toneladas métricas de cobre fino más que el caso base producto de más mineral disponible, equivalentes a 9.042 millones de libras de cobre durante sus casi 20 años de operación, por lo cual el proyecto obtendría un valor presente neto de 1.737 millones de dólares americanos, o sea, 88 millones de dólares más que el caso base.

ITEM	Unidad	INVERSIÓN Periodo 0	OPERACIÓN												Total
			Periodo 1	Periodo 2	Periodo 3	Periodo 4	Periodo 5	Periodo 15	Periodo 16	Periodo 17	Periodo 18	Periodo 19	Periodo 20		
Mina Lastre	Mton		77	77	77	77	77	77	77	77	77	77	67	0	1460
Mina Sulfuro	Mton		29	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29	25	584
Ley Sulfuro Cu	%		0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80
Mov. Total Mina	Mton		107	107	107	107	107	107	107	107	107	107	96	25	2044
Producción Fino Mina	Kton		235	235	235	235	235	235	235	235	235	235	235	203	4661
Tratamiento Planta	Mton		29	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29	25	584,0
Ley Mineral	%		0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80
Recuperación	%		88	88	88	88	88	88	88	88	88	88	88	88	88,0
Producción Cobre	Kton		206	206	206	206	206	206	206	206	206	206	206	178	4.101
Producción Cobre	MLb		455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	393	9.042
Ingresos Venta	MUS\$		1.138	1.138	1.138	1.138	1.138	1.138	1.138	1.138	1.138	1.138	1.138	983	22.606
Gasto Mina	MUS\$		235	235	235	235	235	235	235	235	235	235	235	56	4.520
Gasto Planta	MUS\$		185	185	185	185	185	185	185	185	185	185	185	160	3.679
Gasto G&A	MUS\$		47	47	47	47	47	47	47	47	47	47	47	41	934
Gasto Total	MUS\$		467	467	467	467	467	467	467	467	467	467	467	257	9.134
Inversión	MUS\$		3800	10											
Flujo de Caja	MUS\$		-3800	661	671	671	671	671	671	671	671	671	671	727	9.662
Valor Presente Neto	MUS\$		\$1.737												
Variación Flujo de Caja	MUS\$		274	1	11	11	11	11	11	11	11	11	11	67	274
Variación VPN	MUS\$		588												

Tabla 9.- Evaluación económica caso Integración Mina & Planta.

Fuente: Elaboración Propia.

Otro análisis que se puede inferir, producto de que la integración Mina & Planta no es restrictiva a que sea considerada desde las etapas conceptuales del proyecto, y esta se puede implementar una vez que este se encuentra en operación, del ejercicio anterior, también se puede desprender que si consideramos la inversión del proyecto como hundida, la implementación de la Integración de Mina & Planta generaría un valor adicional de 11 millones de dólares por año en como moda.

Por último, si suponemos que ya estamos en pleno proceso de operación, y que entramos a un periodo de bonanza o de súper ciclo de precios del cobre, y este aumenta 1,0 US\$/Lb, llegando a los 3.5 US\$/Lb promedio durante un año, implementación de la Integración de Mina & Planta generaría un valor adicional de 26 millones de dólares por año en como moda, esto producto de que el tratamiento es la pendiente de la curva del beneficio, tal como vimos capítulos atrás.

7.2- Casos Prácticos.

El primer caso que se presenta es un análisis parcial en donde se implementó la metodología, específicamente en una compañía minera de México el año 2014, presento u potencial de ganancia de 22 millones de dólares al año, a partir del incremento de un 2% en la tasa de procesamiento producto de los minerales más finos que se enviaban a proceso producto de tronaduras más energéticas.

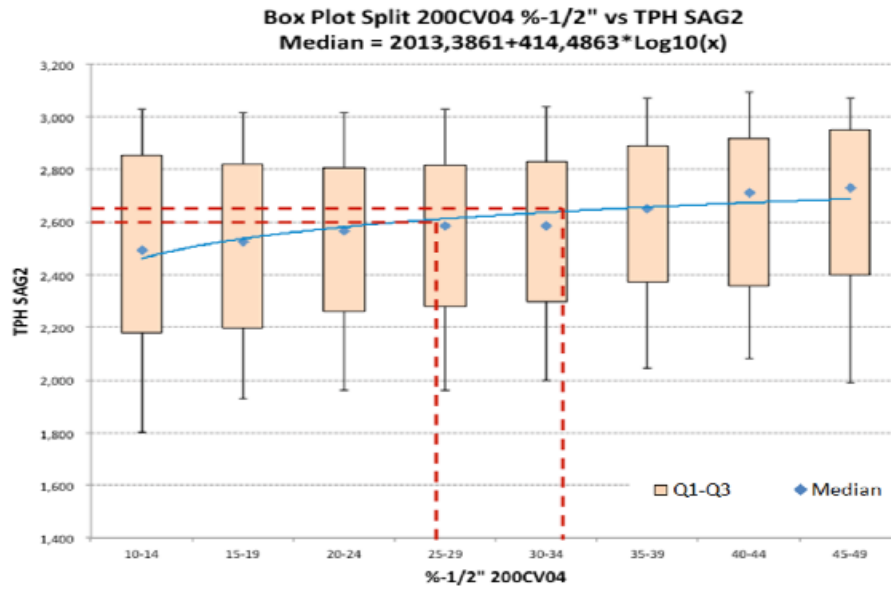


Figura 31.- Porcentaje tamaño -1/2" y tratamiento en Molino SAG2

Fuente: Mina 6, México.

En la figura anterior se aprecia un modelo empírico basado en rangos de fragmentación y tratamiento de cada línea SAG. Los datos que se consideran, corresponden al instante de tiempo en que cada molino SAG, opera en condiciones normales y en forma simultánea con sus dos molinos de bolas. De esta forma es posible corroborar según este modelo simplificado y de acuerdo al tamaño -1/2", que el tratamiento se ve incrementado al aumentar el porcentaje de -1/2", medido a través del equipo Split, lo que de acuerdo a los criterios señalados, al proyectar un %-1/2" igual o apenas superior al 33%, es posible incrementar el tratamiento en un 2% diario aproximadamente.

El segundo caso que se presenta, tiene que ver con un análisis económico que se sustenta en las equivalencias de consumos de energía, y como el uso de explosivos de alta velocidad de detonación favorecen la obtención de material fino a partir de la generación de micro fracturas.

Para entender un poco más respecto de las equivalencias, primero las definiremos, con la finalidad de que cuando se presente el análisis económico, sea claro el concepto de donde proviene el beneficio.

- 1 Kwh = 3.6 Mjoule = 859 kcal.
- 1Kwh de Procesamiento = 1 Kg de explosivo aproximadamente en Tronadura.
- El costo de la Energía Eléctrica (Kwh): 13 -16 Cus\$ y del Explosivo (kg) 45 -70 Cus\$.
- Para afectar 1 tonelada métrica se requiere 1 -20 Kwh v/s 0.1 -0.4 Kg de explosivo.
- Entonces el Costo (Cus\$/t) de afectación sería de 13 -320 v/s 4,5 -28.

En la Compañía Minera 5, en Chile, se realizaron dos pruebas o “Test” de tronadura, uno con un explosivo normal y otro con alta velocidad de detonación y los resultados fueron los siguientes:

Test 1: 16.5 Kwh/ t con Fc = 212 gr./t

Test 2: 15.6 Kwh/ t con Fc = 258 gr./t





Pruebas	Factor de Carga (gr/t)	Works Index (kwh/t)	Costo Energía (Cus\$/t)	Costo Tronadura (Cus\$/t)
Test 1	212	16,5	115,5	14,89
Test 2	258	15,6	109,2	18,56
Variación				

Tabla 10.- Comparación de Test de Tronadura en los procesos.

Fuente: Mina 3, Chile

El costo de la energía en los procesos planta bajó el costo de energía en 6,3 Cus\$/ton y el costo de tronadura subió en 3,67 Cus\$/t, por lo tanto el menor costo fue de 2,63 Cus\$/ton procesada. Si extrapolamos este ahorro, por ejemplo a una planta concentradora que trata 50 millones de toneladas al año, el ahorro estimado sería de 1.3 millones de dólares, sin aun estimar el beneficio producto del mayor tratamiento en el mismo periodo.

El tercer caso, intencionalmente lo hemos dejado para el ultimo, esto en razón a que es el que integra de mejor manera todos los conceptos.

Durante el año 2012, en una mina en el norte de Chile, mina a la que llamaremos Compañía Minera 2, se realizaron una serie de test o pruebas de fragmentación, incluyendo la trazabilidad en todos los procesos aguas abajo, además que dado que en esta compañía la Integración Mina & Planta se implementó muy similar a como se propuso en el modelo “Redefinido” antes visto, a medida que se fueron realizado los test, se pudo estimar sin inconvenientes los efectos o aportes en todos los procesos y el negocio.

ITEMS	Malla N°1 6 x 6	Malla N°2 5 x 5	Unidades
Burden	6	5	metros
Espaciamiento	6	5	metros
Altura de Banco	16	16	metros
Pasadura	2.5	2.5	metros
Diametro de Perforación	270	270	milímetros
Densidad Material	2.95	2.95	gr/cc
Tonelaje Quabrado por Pozo	1,699	1,180	ton
Volumen del Pozo	0.72	0.72	m3
Tonelaje Programado	200,000	200,000	ton
Ancho de Mineado	65	65	metros
Largo Tronadura	65	65	metros
Numero de Pozos	118	169	unidad
Metros Perforación	2,177	3,136	metros
Metros de Repaso	218	314	metros
Largo del Taco	6	6	metros
Tipo de Explosivo	Fortan Extra 50	Fortan Extra 50	unidad
Densidad del Explosivo	1.32	1.32	gr/cc
Precio Explosivo	809	809	US\$/ton
N° de Booster	1	2	unidad
Tipo de Boosters	PENTEX 900	PENTEX 900	unidad
Cono retenedor	1	1	si/no
Precio Material Taco	18	18	US\$/ton
Toneladas de Explosivo	111	160	ton
Factor de Carga			gr/ton
Factor de Energia			Mjoule
Valor Dólar	484	484	CLP
Costo de Perforación	18.5	18.5	US\$/m
Costo de Perforación	477	477	US\$/Hr
Valor de un pozo	342	342	US\$
Total Gasto Perforación	44,295	63,785	US\$
Total Gasto Tronadura			
Explosivos a Granel	89,980	129,571	US\$
Accesorios	8,628	19,075	US\$
Material para Taco	1,164	1,677	US\$
Total Tronadura	99,772	150,323	US\$
Gasto P&T	144,067	214,108	US\$
Costo P&T	0.72	1.07	US\$/ton

Cara Libre

Cara Libre

Figura 32.- Ejemplo Comparativo de Test de Tronadura.

Fuente: Compañía Minera 2, Chile.

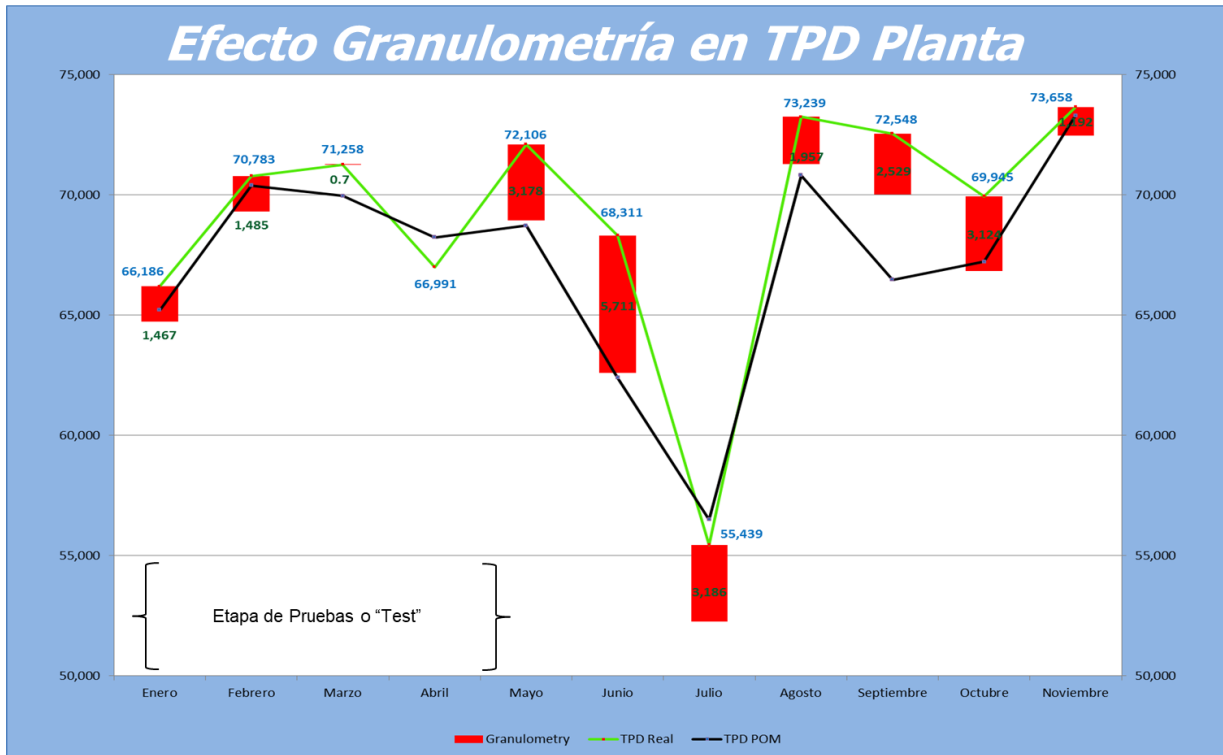


Figura 33.- Efecto o Aporte de la Granulometría al Tratamiento Planta.

Fuente: Compañía Minera 2, Chile.

En la figura 35 se aprecia el efecto positivo de los test de tronadura, a partir de una mejor configuración del patrón de perforación, tipos de explosivos más intensos y menores tiempos de iniciación, sumado a la correcta clasificación de los sobre tamaños y minerales tipo “pebbles”. Se puede notar que el aporte en varias ocasiones permitió superar el plan de producción y en ocasiones soslayar pérdidas de procesamiento por otra índole, como por ejemplo la confiabilidad de los activos.

La figura de un “Sponsor” o patrocinador permanente y transversal, provoco que las pruebas se desarrollaran por más de una año, lo que permitió ver resultados más allá de un corto periodo de tiempo, no solo información puntual como es el común de los casos, si no que tendencias claras de como la Integración Mina & Planta genera valor a una compañía.

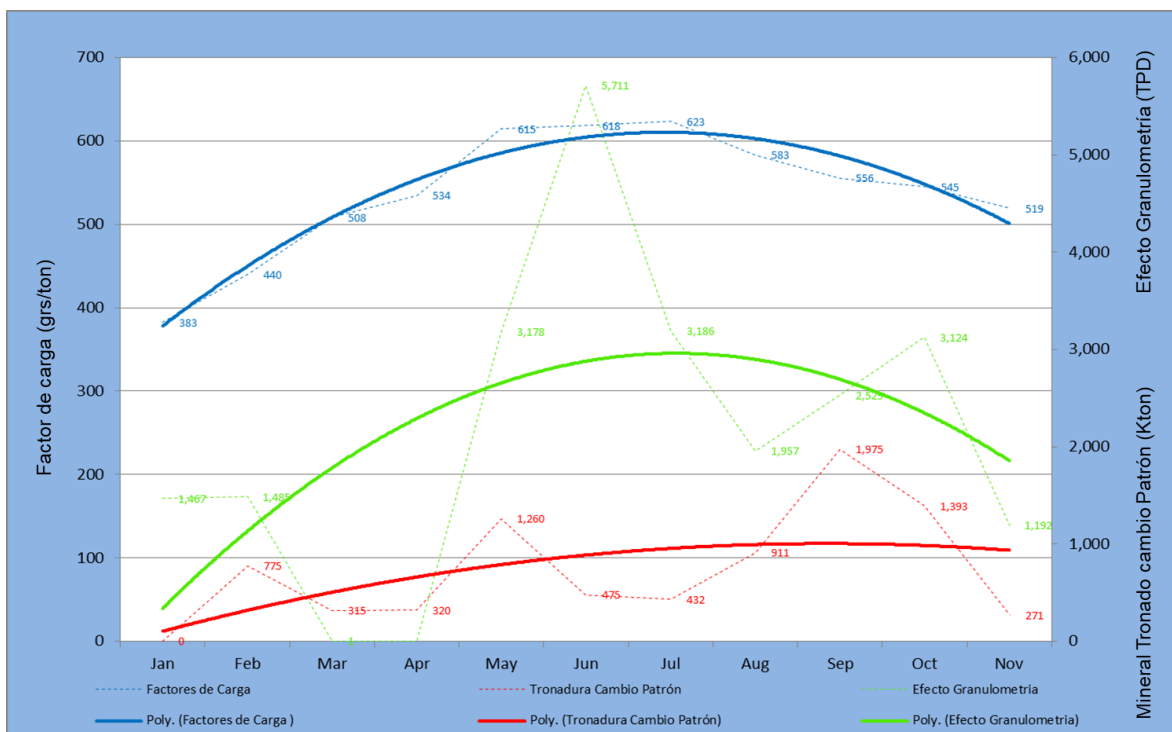


Figura 34.- Correlación entre el aumento de intensidad de las tronaduras y el tratamiento de molienda

Fuente: Compañía Minera 2, Chile.

Por último, luego de más de un año de pruebas y de aplicación de la metodología, se realizó un balance global de once meses de implementación y los resultados arrojaron que el aporte o agregación de valor al negocio fue por poco casi 18 millones de dólares el año 2012. Este balance o análisis no considero los efectos de ahorro en energía en los procesos planta, por lo que se estima que perfectamente debió haber superado los 20 millones de ganancia, en relación a la capacidad de la planta de esta compañía minera.

ITEM	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	YTD
Días Operativos	31	29	31	30	31	30	31	31	30	31	30	335
Mineral transportado: desde la mina (kt)	376	1,084	1,068	977	1,038	1,006	989	1,172	1,285	1,036	1,598	11,630
%Cu	0.47%	0.55%	0.52%	0.48%	0.47%	0.55%	0.46%	0.57%	0.67%	0.91%	0.99%	0.63%
Remanejo desde stock (kt)	1,456	727	969	762	946	715	527	756	703	664	542	8,767
%Cu	0.47%	0.42%	0.37%	0.37%	0.36%	0.38%	0.36%	0.39%	0.41%	0.56%	0.53%	0.42%
Minas Subterráneas (Kt) *	262	335	327	255	276	326	408	282	277	302	183	3,233
%Cu	0.87%	0.89%	0.89%	0.94%	1.01%	0.98%	0.97%	1.16%	1.07%	1.03%	1.07%	0.98%
TPD	66,186	70,783	71,258	66,991	72,106	68,311	55,439	73,239	72,548	69,945	73,658	69,133
Tonelaje total Molido (Kt)	2,052	2,053	2,209	2,010	2,235	2,049	1,719	2,270	2,176	2,168	2,210	23,151
Ley de Molienda %Cu	0.55%	0.51%	0.51%	0.48%	0.49%	0.54%	0.53%	0.56%	0.58%	0.74%	0.85%	0.58%
Recuperación Planta Cu	93.31%	93.58%	92.24%	92.83%	93.02%	93.36%	91.99%	91.41%	93.24%	93.39%	93.36%	92.89%
Libras Pagables de Cobre ('000 lbs)	22,273	20,885	21,935	19,015	21,706	21,842	17,780	24,498	25,001	31,650	37,358	263,941
Tronaduras Mineral Cambio Patrón (Kt)	0	775	315	320	1,260	475	432	911	1,975	1,393	271	8,127
Delta Costo T. Cambio Patrón (US\$/ton)	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35
Gasto adicional D&B (KUS\$)	0	271	110	112	441	166	151	319	692	488	95	2846
Menor consumo de Bolas Molienda SAG (ton)	0	35	283	252	421	582	387	566	457	416	651	4,051
Precio Bolas (US\$/ton)	1,405	1,522	1,435	1,394	1,353	1,357	1,216	1,359	1,355	1,348	1,296	1,341
Ahorro por menor consumo de Bolas (KUS\$)	0	54	406	352	570	790	471	769	619	561	844	5,434
Aporte Granulometría TPD	1,467	1,485	1	-1	3,178	5,711	3,186	1,957	2,529	3,124	1,192	2,166
Aporte Granulometría ('000 lbs)	513	454	0	0	995	1,899	1,063	683	905	1,470	628	8,608
Costo por libra () (US\$/lb)	2.0	2.0	2.0	2.27	2.07	1.58	1.79	2.91	1.05	1.84	0.99	1.86
Precio del Cobre (US\$/lb)	3.65	3.82	3.84	3.75	3.59	3.37	3.44	3.40	3.66	3.66	3.49	3.61
Ingreso por aporte de libras al periodo (KUS\$)	845	827	0	0	1,517	3,383	1,756	333	2,361	2,674	1,569	15,265
Flujo Ingresos (KUS\$)	845	609	296	239	1,646	4,006	2,076	783	2,288	2,747	2,318	17,853

Tabla 11.- Análisis Económico de Integración Mina & Planta año 2012, Mina 2, Chile.

Fuente: Compañía Minera 2, Chile.

8.- Conclusión.

A continuación se presentan las principales conclusiones:

- Implementar la metodología de Integración de Minas & Plantas propuesta, u otra, que logre generar un encadenamiento entre los procesos a partir de un propósito común, sin lugar a dudas permitirá generar mayor valor o excedentes a la compañía minera que lo implemente adecuadamente. De acuerdo al análisis teórico y casos prácticos, se estima que el beneficio puede oscilar entre los 10 a 30 millones de dólares por año, dependiendo del nivel de profundidad de la implementación y el tamaño de la operación.
- El diferencial económico positivo o la agregación de valor se generan a partir de la producción de mayor cantidad de elemento de valor por unidad de tiempo y de la reducción de costos por escalamiento principalmente.
- La mayoría de las compañías mineras poseen suficientes recursos, equipos, herramientas, etc, para implementar la metodología, y las inversiones o gastos en que se debe incurrir para materializarla son menores respecto del beneficio que genera. Las mayores brechas detectadas tienen que ver con sistemas de monitoreo en línea y trazadores, incluir a las áreas más allá de la operación y aceptar que a pesar de que el uso de explosivos de alta intensidad genera mayores costos en un proceso en particular, estos son largamente compensados en los procesos aguas abajo y final.
- Un punto central para la implementación de la metodología, tiene que ver con definir un “Sponsor” o patrocinador jugado, que sea transversal y jerárquicamente superior, formal e informalmente, a los líderes o responsables de los procesos particulares. La experiencia muestra que el éxito de la implementación fracasa o no es lo que se espera, no por no conocer la técnica, si no por hacer prevalecer el propósito particular por sobre el común.
- Desde la experiencia, o sea, de los casos de éxitos conocidos y los que no ha resultado, se aprecia una correlación entre el tiempo de permanencia de los ejecutivos en las compañías mineras y la implementación de la metodología. Lo anterior puede radicar en que para implementar la metodología, lograr que madure y luego se inserte en la cultura, es más tiempo que el que los ejecutivos permanecen en una compañía, por lo cual pudiera no ser prioridad de su gestión si se quieren conseguir resultados inmediatos.

- Con los avances tecnológicos, la revolución del internet de las cosas, big data, analítica avanzada, la implementación de la metodología casi no tiene barreras técnicas, y la no implementación de ella tiene que ver con no conocer la importancia de aplicarla o bien con que el foco de la compañía respecto de la estrategia de producción está en un nivel menor de madurez, como por ejemplo estabilizar y consolidar resultados a partir del aprovechamiento de los activos.

- Generar un modelo base, establecer acciones concretas y controlarlas para cerrar las brechas, realizar pilotajes periódicos, estimar la granulometría en línea, trazar los minerales, definir los KPI's cada proceso que afectan el negocio global, certificar los procesos y con ello las curvas granulométricas, son pasos claves para estimar correctamente el aporte de la integración a partir de la granulometría, a partir del tratamiento efectivo de una planta.

- Por último, un método para “vender” la implementación a los propietarios, accionistas o altos ejecutivos, puede ser mediante planes mineros desafiantes a los de presupuesto oficial, que se enfoquen en representar el retorno comparativo en un horizonte de 5 años, realizando la bajísima inversión y riesgo. A esto se debe acompañar casos de éxitos conocidos y una propuesta de sistema de gestión que de vida a la implementación de la integración de Mina & Planta.

9.- Bibliografía.

- Proyecto BTCS, Blasting to Customer Specifications – Tronadura para Beneficio Global Mina, CINTEX, JKMRC, Blastronics, Santiago, Mayo 2002.
- Proyecto BTCS, Jornadas de Tronadura ASIEX 2002, Iquique, 28 – 29 de Nov. 2002. I. Villalba, C. Mckenzie, G. Chitombo y C. Orlandi.
- IMPLEMENTACIÓN DEL CONCEPTO MINE TO MILL, PHELPSDOGE/FREEPORT McMoran Sudamérica, “Champion” Divisional Roberto Rojas Rivera, en colaboración con JKTech, Universidad de Queensland, Blast Consult – John Floyd, Chile 2012 al 2013.
- Mine to Mill Reconciliation – Three Case Studies, N A Schofield, J Moore and J T Carswell.
- El concepto “Mine to Mill” (Operación integrada de Mina a Planta), Cátedra ANEFA/MAXAM, Madrid -26 de noviembre de 2007.
- VOLADURAS DE ALTA INTENSIDAD Y SU INFLUENCIA EN EL CHANCADO Y MOLIENDA DEL PÓRFIDO CUPRÍFEROS DE CERRO VERDE, Tesis presentada por David Pacheco y Oscar Fernando, Arequipa, Perú 2013.
- Efectos económicos y de producción en el proceso de optimización de la carga específica del explosivo y su relación con las microfracturas generadas por Tronadura, Mario Fribla, U. De Atacama y Carlos Orlandi, Enaex, 2as Jornadas de Tronadura ASIEX 2000.
- MATHEMATICAL MODELLING OF BLASTING DECISIONS USING AN INTEGRATED OPEN PIT MINE TO MILL MODEL, por Andres Pérez Errázuriz, Santiago Noviembre 2017.
- “Seminario Mine to Mill” JKTECK, Santiago, Chile – 29 al 31 de Agosto 2018.
- Aplicación de casos en minas como Chuquicamata, Andina, Candelaria, Cerro Verde, Pelambres y Peñasquito.
- Desafíos en el modelo de procesamiento de Candelaria, Procemin 2016.
- Concentración de Minerales, Notas de Concentración de Minerales IM CIMEX 2008.
- Antofagasta Explosivos, La Energía del Menor Costo, 19 Agosto 2009.
- “Sobre el Oportunismo en los Negocios: del Beneficio Legítimo a la Kairospatía”. Teodoro Wigodski. Editorial JC Sáez. Abril 2015.

10.- Anexos.

10.1.- Las principales características físicas de los minerales.

Dureza: Se llama dureza al grado de resistencia que opone un mineral a la deformación mecánica.

Un método útil y semicuantitativo para la determinación de la dureza de un mineral fue introducido por el químico alemán Mohs. El creyó una escala de dureza de 10 niveles. Para cada nivel existe un mineral representativo y muy común. El mineral del nivel superior perteneciendo a esta escala puede rayar todos los minerales de los niveles inferiores de esta escala.

La dureza de un mineral desconocido puede averiguarse rascando entre sí una cara fresca del mineral desconocido con los minerales de la escala de MOHS. El mineral más duro es capaz de rayar el mineral más blando. Los minerales de la escala de MOHS que rayan el mineral desconocido son más duros como esto, los minerales que son rayados por el mineral desconocido son menos duros. Por tanto la dureza del mineral desconocido se estrecha entre el nivel superior del mineral que puede rayarlo y el nivel inferior del mineral que es rayado por este mineral. La dureza de un mineral depende de su composición química y también de la disposición de sus átomos. Cuanto más grande son las fuerzas de enlace, mayor será la dureza del mineral.

Escala de dureza según MOHS		
Dureza	Mineral	Comparación
1	Talco	La uña lo raya con facilidad
2	Yeso	La uña lo raya
3	Calcita	La punta de un cuchillo lo raya con facilidad
4	Fluorita	La punta de un cuchillo lo raya
5	Apatito	La punta de un cuchillo lo raya con dificultad
6	Feldespato Potásico	Un trozo de vidrio lo raya con dificultad, Feldespato no raya el martillo geológico
7	Cuarzo	Puede rayar un trozo de vidrio y con ello el acero despide chispas. Cuarzo raya el martillo geológico
8	Topacio	Puede rayar un trozo de vidrio y con ello el acero despide chispas
9	Corindón	Puede rayar un trozo de vidrio con facilidad.
10	Diamante	Puede rayar un trozo de vidrio con alta facilidad

Anexo 10.1.- Escala de dureza de los minerales.

Fuente: Geovital

Exfoliación: Los cuerpos cristalinos pueden exfoliarse en superficies lisas a lo largo de determinadas direcciones, mediante la influencia de fuerzas mecánicas externas, por ejemplo mediante de la presión o de golpes de un martillo.

Esta llamativa exfoliación depende del orden interno existente en los cristales. Los planos de exfoliación o bien de clivaje son la consecuencia del arreglo interno de los átomos y representan las direcciones en que los enlaces que unen a los átomos son relativamente débiles. La superficie de exfoliación corresponde siempre a caras cristalinas sencillas.

Una relación entre la dureza y la exfoliación tiene que ver con la ausencia de esta última, ya que generalmente a mayor dureza los átomos están dispuestos con tal regularidad que los enlaces entre los mismos son muy similares en todas direcciones. En consecuencia, no existe tendencia a que el mineral se rompa según un plano particular.

Densidad o peso específico: Cada mineral tiene un peso definido por centímetro cúbico; este peso característico se describe generalmente comparándolo con el peso de un volumen igual de agua; el número de masa resultante es lo que se llama 'peso específico' o 'densidad' del mineral.

El peso específico de un mineral aumenta con el número de masa de los elementos que la constituyen y con la proximidad o el apretamiento en que estén arreglados en la estructura cristalina. La mayoría de los minerales que forman rocas tienen un peso específico de alrededor de 2,7 g/cm³, aunque el peso específico medio de los minerales metálicos es aproximadamente de 5 g/cm³. Los minerales pesados son los que tienen un peso específico más grande que 2,9 g/cm³, por ejemplo circón, pirita, piroxeno, granate.

Tenacidad: Comportamiento del mineral bajo fuerzas. Se observa como el mineral se comporta físicamente si se aplica una fuerza al mineral. En la práctica se puede diferenciar:

- Frágil: El mineral que se rompe o pulveriza con facilidad. Ejemplos: cuarzo y el azufre. Es la forma "normal" como responden minerales a un ataque de fuerzas.
- Maleable: Minerales que se puede deformar con las manos en láminas o planchas (con un poco de calor). Ejemplos: oro, plata, platino, cobre, estaño.
- Dúctil: El mineral puede ser deformado a hilos o alambres delgados. Ejemplos: oro, plata y cobre. No es muy útil en el reconocimiento de minerales del día a día.
- Flexible: El mineral se dobla fácilmente pero no vuelve a su estado inicial. Ejemplos: yeso y talco (difícil observar esto en estos minerales).
- Elástico: Mineral que puede ser doblado y, una vez deja de recibir presión, vuelve a su forma original. Ejemplo: la mica, biotita, moscovita etc.

10.2.- Vista ampliada de análisis económico caso base.

ANALISIS ECONOMICO CASO BASE															
ITEM	Unidad	INVERSIÓN Periodo 0	OPERACIÓN											Total	
			Periodo 1	Periodo 2	Periodo 3	Periodo 4	Periodo 5	Periodo 15	Periodo 16	Periodo 17	Periodo 18	Periodo 19	Periodo 20		
Mina Lastre	Mton		74	74	74	74	74	74	74	74	74	74	74	0,0	1400,0
Mina Sulfuro	Mton		28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	560,0
Ley Sulfuro Cu	%		0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81
Mov. Total Mina	Mton		102	102	102	102	102	102	102	102	102	102	102	28	1960,0
Producción Fino Mina	Kton		227	227	227	227	227	227	227	227	227	227	227	227	4539
Tratamiento Planta	Mton		28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	560,0
Ley Mineral	%		0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81
Recuperación	%		88	88	88	88	88	88	88	88	88	88	88	88	88
Producción Cobre	Kton		200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	3.994
Producción Cobre	MLb		440	440	440	440	440	440	440	440	440	440	440	440	8.806
Ingresos Venta	MUS\$		1.101	1.101	1.101	1.101	1.101	1.101	1.101	1.101	1.101	1.101	1.101	1.101	22.015
Gasto Mina	MUS\$		203	203	203	203	203	203	203	203	203	203	203	203	4.067
Gasto Planta	MUS\$		196	196	196	196	196	196	196	196	196	196	196	196	3.920
Gasto G&A	MUS\$		42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	840
Gasto Total	MUS\$		441	441	441	441	441	441	441	441	441	441	441	441	8.827
Inversión	MUS\$	3800													
Flujo de Caja	MUS\$	-3800	659	659	659	659	659	659	659	659	659	659	659	659	9.388
Valor Presente Neto	MUS\$	\$1.649													

10.3.- Vista ampliada de análisis económico caso Integración Mina & Planta.

ANALISIS ECONOMICO CASO INTEGRACIÓN MINA & PLANTE															
ITEM	Unidad	INVERSIÓN Periodo 0	OPERACIÓN											Total	
			Periodo 1	Periodo 2	Periodo 3	Periodo 4	Periodo 5	Periodo 15	Periodo 16	Periodo 17	Periodo 18	Periodo 19	Periodo 20		
Mina Lastre	Mton		77	77	77	77	77	77	77	77	77	77	67	0	1460
Mina Sulfuro	Mton		29	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29	25	584
Ley Sulfuro Cu	%		0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80
Mov. Total Mina	Mton		107	107	107	107	107	107	107	107	107	107	96	25	2044
Producción Fino Mina	Kton		235	235	235	235	235	235	235	235	235	235	235	203	4661
Tratamiento Planta	Mton		29	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29	25	584,0
Ley Mineral	%		0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80
Recuperación	%		88	88	88	88	88	88	88	88	88	88	88	88	88,0
Producción Cobre	Kton		206	206	206	206	206	206	206	206	206	206	206	178	4.101
Producción Cobre	MLb		455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	393	9.042
Ingresos Venta	MUS\$		1.138	1.138	1.138	1.138	1.138	1.138	1.138	1.138	1.138	1.138	1.138	983	22.606
Gasto Mina	MUS\$		235	235	235	235	235	235	235	235	235	235	235	56	4.520
Gasto Planta	MUS\$		185	185	185	185	185	185	185	185	185	185	185	160	3.679
Gasto G&A	MUS\$		47	47	47	47	47	47	47	47	47	47	47	41	934
Gasto Total	MUS\$		467	467	467	467	467	467	467	467	467	467	467	257	9.134
Inversión	MUS\$	3800	10												
Flujo de Caja	MUS\$	-3800	661	671	671	671	671	671	671	671	671	671	671	727	9.662
Valor Presente Neto	MUS\$	\$1.737													
Variación Flujo de Caja	MUS\$	274	1	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	67	274
Variación VPN	MUS\$	\$88													