



**UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FISICAS Y MATEMATICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA INDUSTRIAL**

EVALUACION DE UN CAMBIO TECNOLOGICO
PARA EL PROCESAMIENTO DE MINERALES DE ALTA DUREZA

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGISTER EN
GESTION Y DIRECCION DE EMPRESAS

CARLOS ROBERTO DELGADO ROBLES

PROFESOR GUIA:

LUIS ZAVIEZO SCHWARTZMAN

MIEMBROS DE LA COMISION:

WALTER CAZENAVE GUIER

OSCAR VALENZUELA SANDOVAL

SANTIAGO DE CHILE

AGOSTO DE 2013

RESUMEN

El presente caso de estudio tiene como objetivo principal evaluar el impacto económico de un cambio tecnológico en la etapa de molienda primaria del proceso de concentración en Minera Escondida Ltda. para minerales con altos índices de dureza.

Los factores más relevantes que motivan la búsqueda de alternativas eficientes de procesamiento son (i) el *incremento sostenido en los índices de dureza* de la roca, lo que incrementa de manera significativa el consumo de energía y la inversión de capital necesario para mantener los niveles de producción, (ii) la *disminución de las leyes de cobre* en los procesos de concentración, lo que implica mover un mayor volumen para lograr niveles de producción similares, (iii) los *altos niveles en el precio del cobre*, que han empujado a la industria a aprovechar el entorno de mercado auspicioso, y (iv) la importancia de *incorporar tecnologías más eficientes en consumo de energía*, alineadas con la estrategia medioambiental de la compañía.

La alternativa estudiada en el presente trabajo es el reemplazo de un circuito de molienda semiautógeno y molienda de bolas por un circuito con mayor eficiencia energética del tipo chancado secundario y HPGR. Se concluye que la opción tecnológica estudiada genera valor en el contexto de una planificación integrada para las reservas mineras disponibles y puede obtenerse una reducción del costo operacional en más de un 7 %, impactando de manera importante los consumos de energía y acero, dos de los ítems de costo más significativos en una planta concentradora. La reducción de emisiones de CO₂, pueden llegar a disminuir en un 25 % mejorando significativamente la huella de carbono de la compañía, reduciendo el impacto ambiental.

Este trabajo es el punto de partida para iniciar una discusión profunda acerca de las ventajas que un cambio tecnológico puede provocar en los planes futuros de Minera Escondida Ltda, tanto en términos de la mayor producción obtenida como por los beneficios en costos de operación y el grado de alineamiento que muestra respecto de las políticas medioambientales en el mediano plazo.

DEDICATORIA

Dedicado a mi infinitamente amada familia: mi esposa Samantha, y a mis hijos Samantha Michelle, Catalina Paz y Lucas Andrés, por su comprensión y apoyo para alcanzar este hito.

A mis padres por forjarme en los valores y enseñanzas para perseverar y mantener la energía en la vida.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco sinceramente a todos los líderes de los cuáles he aprendido y sacado algo importante para mi desarrollo personal y profesional: César Cabrera, Paul Díaz, Roberto Medina, Raúl Roco, Richard Preece, Luis Gallardo, Leonardo Flores, Luis Soto, Jorge Camacho, Walter Véliz y Oscar Valenzuela.

A Minera Escondida Ltda. por darme la oportunidad de aportar en su desarrollo.

TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN.....	8
2.	DESCRIPCIÓN DE LA ORGANIZACIÓN.....	9
2.1.	Principales Áreas de Negocio de la Compañía.....	10
2.2.	Descripción del Proceso.....	11
2.3.	Principales cifras.....	13
2.4.	Estructura organizacional.....	15
2.5.	Descripción del Mercado.....	16
3.	DESCRIPCIÓN DEL TEMA.....	20
3.1.	Resumen.....	20
4.	OBJETIVOS Y RESULTADOS ESPERADOS.....	21
4.1.	Objetivo general.....	21
4.2.	Objetivos específicos.....	21
4.3.	Resultados esperados.....	21
5.	ANTECEDENTES.....	22
5.1.	Fundamentos de Conminución.....	22
5.2.	Objetivo de los Procesos de Conminución.....	22
5.3.	Relación entre Energía y Tamaño de Partícula.....	24
5.4.	Indicadores de Dureza y Consumo de Energía.....	25
5.5.	Dureza en los Depósitos de Cobre Porfídicos.....	28
5.6.	Molienda Semi Autógena (SAG).....	30
5.7.	Factores que Afectan el Rendimiento en Molienda SAG.....	32
5.8.	Molinos de Rodillos de Alta Presión - HPGR.....	34
6.	ESTUDIO DE CASO - CONTEXTO.....	38
6.1.	El Incremento de los costos de Operación.....	38
6.2.	Aumento de las Regulaciones - Emisiones de Carbono.....	42

6.3. El Cambio Tecnológico como Alternativa.....	44
6.4. Estudio de Caso - Diseño de Circuito SAG versus HPGR.....	45
6.5. Alcance del Tema.....	46
6.6. Opciones a Estudiar.....	47
6.7. Metodología.....	49
6.8. Criterios para la Evaluación Económica	50
6.9. Resultado de la Evaluación Económica.....	53
7. CONCLUSIONES.....	57
BIBLIOGRAFÍA.....	59

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 : Resumen de Producción y Costos de Minera Escondida Ltda.....	14
Tabla 2 : Consumo Energético Histórico para Minera Escondida Ltda.....	15
Tabla 3 : Producción de Cobre de Mina en Miles de Toneladas.....	19
Tabla 4 : Demanda de Cobre Refinado en Miles de Toneladas.....	20
Tabla 5 : Balance Proyectado de Mercado.....	20
Tabla 6 : Tamaños Característicos de Partículas en Alimentación y Producto de acuerdo a la etapa de conminución correspondiente.....	24
Tabla 7 : Valores Típicos de Bond Work Index para distintos minerales, Bond 1961.....	27
Tabla 8 : Resultado de Valor Actual Neto adicional entre ambas opciones estudiadas.....	54
Tabla 9 : Variación de la Tasa de Descuento y su efecto sobre el VAN adicional entre ambas opciones estudiadas.....	55
Tabla 10 : Efecto del Precio de la Energía sobre el VAN adicional entre ambas opciones estudiadas.....	56
Tabla 11 : Efecto del Cambio Tecnológico sobre el Gasto Operacional.....	57

INDICE DE ILUSTRACIONES

Figura 1 : Disposición General de las instalaciones en Minera Escondida Ltda.....	11
Figura 2 : Diagrama del Proceso General de Producción de Minera Escondida Ltda.....	12
Figura 3 : Diagrama del Proceso de Concentración en Minera Escondida Ltda.....	13
Figura 4 : Evolución de los niveles de Costos y Ley de Cobre para Minera Escondida Ltda.....	14
Figura 5 : Evolución de los niveles de Producción para Minera Escondida Ltda.....	15
Figura 6 : Gasto Total de Energía en Minera Escondida Ltda. como porcentaje de su costo de explotación.....	16
Figura 7 : Estructura Organizacional Ejecutiva Minera Escondida Ltda.....	16
Figura 8 : Participación de la Demanda por Cobre Refinado.....	17
Figura 9 : Operaciones Unitarias de Conminución en un proceso típico de Concentración.....	24
Figura 10 : Relaciones Energía-Tamaño de Partícula de acuerdo a la ecuación de Walker et al.....	25
Figura 11 : Relación entre DWi y Consumo de Energía Específico para circuitos AG/SAG.....	28
Figura 12 : Distribución del Costo variable en un Concentrador típico de pórfidos de cobre.....	29
Figura 13 : Esquema General en Depósitos de Cobre Porfídicos.....	30
Figura 14 : Datos de Dureza (SPI) hacia zonas profundas en Escondida y Escondida Norte.....	30
Figura 15 : Esquema de molino Semiautógeno.....	31
Figura 16 : Dinámica Interna en un molino Semiautógeno.....	32
Figura 17 : Configuración del Circuito de Conminución en el Proceso de Concentración en Minera Escondida.....	33
Figura 18 : Efecto de la Granulometría sobre el Rendimiento de la Molienda SAG.....	34

Figura 19 : Crecimiento de la aplicación de HPGR en la Industria Minera.....	36
Figura 20 : Principio de Conminución del Molino de Rodillos de Alta Presión HPGR.....	36
Figura 21 : Esquema de un Molino HPGR.....	37
Figura 22 : Evolución del Cash Cost Directo (C1P) de acuerdo a los cuartiles de la industria.....	39
Figura 23 : Deterioro de las Leyes de Cobre de la Industria.....	40
Figura 24 : Esquema de la Evolución de la explotación de las zonas de mineralización en un Pórfido de Cobre hacia minerales hipógenos.....	41
Figura 25 : Evolución del Perfil de Dureza y su relación con el tipo de mineralización de sulfuros.....	42
Figura 26 : Evolución del Precio de la Energía en Países Sudamericanos	43
Figura 27 : Proyección de Emisiones de CO2 por sector productivo.....	44
Figura 28 : Valor Actual Neto de las opciones estudiadas respecto de la proyección de dureza en el plan minero evaluado.....	54
Figura 29 : Variación del VAN adicional que produce la alternativa HPGR en función de la Tasa de Descuento empleada en la evaluación financiera.....	55
Figura 30 : Relación entre el Precio de la Energía y el VAN adicional entre ambas opciones estudiadas.....	56
Figura 31 : Efecto de la Opción HPGR en el Costo Unitario y su relación con la dureza en el plan minero.....	57

1. INTRODUCCIÓN

El presente caso de estudio tiene como objetivo principal evaluar el impacto económico de un cambio tecnológico en la etapa de reducción de tamaño en el proceso de concentración en Minera Escondida Ltda. para minerales con altos índices de dureza.

El mejoramiento de los procesos actuales permitiría alcanzar un incremento de 15 % en los niveles de producción, y una disminución de 10 % en el costo de operación por menor uso de energía e insumos necesarios para la producción .respecto del caso base dado por la tecnología convencional.

Debido a que la energía utilizada en los procesos de conminución representa entre el 50 y 70 % del total del consumo energético en el procesamiento de minerales, esta iniciativa es un fuerte incentivo para la búsqueda de alternativas a las prácticas de conminución existentes. De este modo, la propuesta de valor considera aumentar el potencial de procesamiento de minerales futuros y disminuir el consumo específico de energía en el proceso de conminución, aprovechando las opciones tecnológicas ya probadas y disponibles en el mercado.

Los factores más relevantes que motivan este estudio son (i) el *incremento sostenido en los índices de dureza* de la roca, lo que aumenta de manera significativa el consumo de energía, (ii) la inversión de capital necesario para mantener los niveles de producción, (iii) la *disminución sostenida de las leyes de cobre* en los procesos de concentración, lo que implica mover un mayor volumen para lograr niveles de producción similares y (iv) los *altos niveles en el precio del cobre*, que han empujado a la industria a aprovechar el entorno de mercado auspicioso.

Aun cuando las alternativas tecnológicas estudiadas en el presente trabajo, han sido extensamente aplicadas en la minería del hierro, diamantes y oro, desde hace más de veinte años, su implementación a nivel industrial en la minería del cobre es muy limitada, debido tanto a las imperfecciones de información disponible en la industria, como al alto riesgo de inversión en tecnología no probada.

2. DESCRIPCIÓN DE LA ORGANIZACIÓN

El presente estudio de caso se desarrollará en la industria de la minería del cobre, específicamente en Minera Escondida Ltda. que tiene sus operaciones en la Región de Antofagasta en el norte de Chile, en pleno Desierto de Atacama, a 170 kilómetros al sureste de la ciudad de Antofagasta y a 3.150 metros sobre el nivel del mar. Los accionistas de la compañía son BHP Billiton Ltd.(57,5 %) el cual es el operador de Escondida, Rio Tinto Ltd. (30 %) y Mitsubishi Corporation – a través de JECO Corporation - (12,5 %), empresas mineras altamente destacadas en el mundo, para quienes Escondida representa una importante inversión estratégica. El apoyo de estos propietarios se traduce en un importante respaldo técnico y financiero. La dirección superior de Minera Escondida ha sido encomendada por los socios a un Comité de Propietarios, compuesto por integrantes de los accionistas de la compañía.

La construcción de la operación comenzó en agosto de 1988, e inició su producción en noviembre de 1990, a un ritmo de 35.000 tpd. Hoy, después de 20 años, la mina alimenta más de 550.000 tpd de mineral al proceso extractivo.

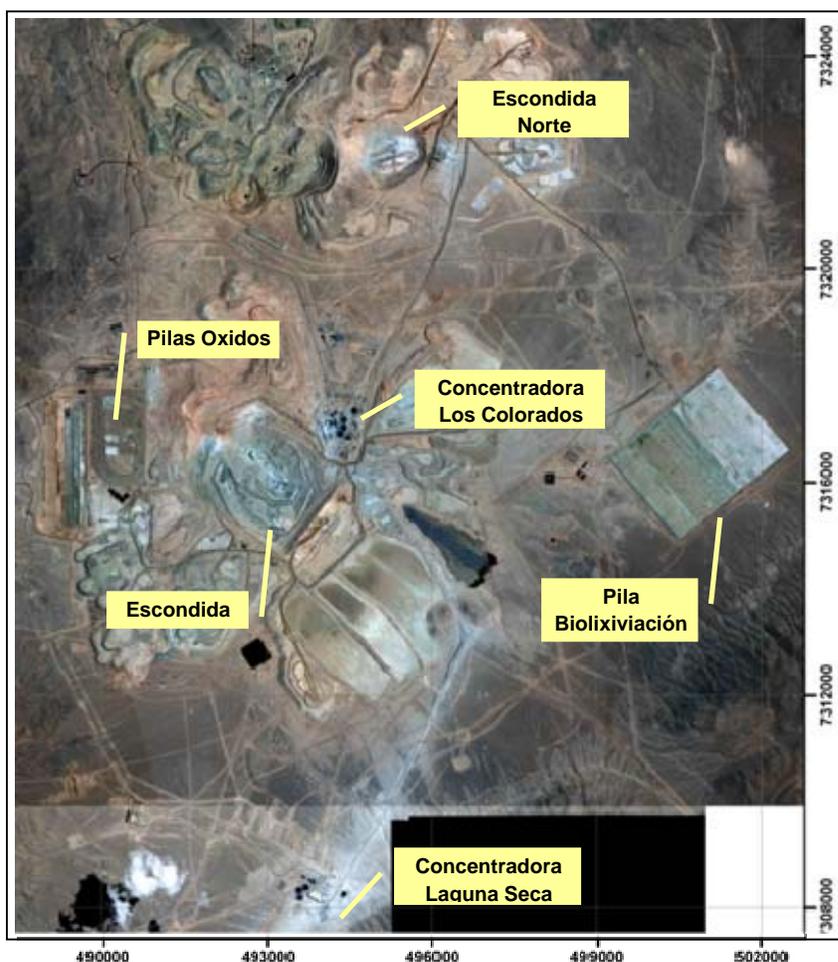
Minera Escondida posee una de las mayores reservas de cobre en el mundo, lo que le entrega sustentabilidad a su operación. Al 30 de Junio de 2011, los recursos medidos de Minera Escondida son de 3.079 millones de toneladas con una ley media de 0,75 % de cobre. Mientras que las reservas demostradas que posee la compañía en sus yacimientos Escondida y Escondida norte equivalen a más de 49 años de operación. La operación de Escondida está expuesta a la caída natural que experimenta la ley del mineral extraído, al igual que cualquier operación minera. Este aspecto se traduce en una continua presión hacia un mayor costo directo y un menor nivel de producción. La compañía está desarrollando proyectos orientados a contrarrestar el efecto de la menor ley de cobre.

El distrito minero de Escondida alberga dos de los más grandes sistemas porfídicos de cobre del mundo, con sobre imposición de depósitos supérgenos-enriquecidos: Escondida, que es la mina a rajo abierto que más cobre produce en el mundo, y *Escondida Norte* ubicada a 5 kilómetros al norte de la mina principal las que presentan como especies minerales de sulfuros calcosina, covelina, y calcopirita. Existen zonas oxidadas minoritarias donde se puede encontrar brocantita y antlerita como especies principales.

2.1. Principales Áreas de Negocio de la Compañía

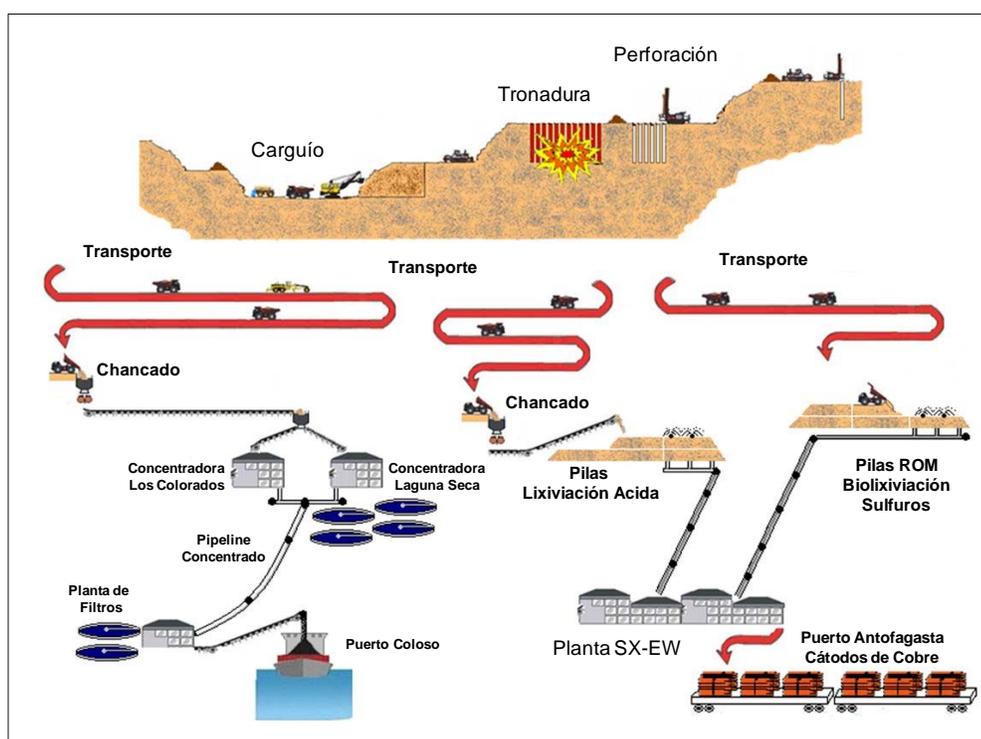
Minera Escondida Limitada es una empresa dedicada a la exploración, extracción, procesamiento y comercialización de recursos minerales del distrito Escondida. Las características de los recursos geológicos han permitido definir dos líneas de productos primarios principales : Concentrado y cátodos de cobre. Además, la empresa obtiene beneficios económicos significativos por el oro y la plata recuperada en calidad de subproductos de la producción de cobre, los que comercializa en forma de metal contenido en concentrado. Actualmente, Escondida es uno de los mayores productores y exportadores de concentrado de cobre no integrado del mundo. La Figura 1 muestra la disposición general de las instalaciones en la mina.

Figura 1 : Disposición General de las instalaciones en Minera Escondida Ltda.



Para alcanzar estos niveles de producción la infraestructura de la compañía considera dos minas a rajo abierto, 2 plantas concentradoras y una planta de lixiviación ácida que procesa óxidos para producir cátodos (SX-EW) y una pila de lixiviación de sulfuros de baja ley mediante biolixiviación, la cual produce cátodos de cobre. El concentrado de cobre es transportado mediante dos ductos hasta la planta de filtración, ubicada en el sector de Puerto Coloso, donde finalmente es embarcado hacia el cliente final. Debido a que el alcance del presente estudio considera el proceso de concentración, se omite una descripción del proceso de obtención de cátodos, el que se puede observar esquemáticamente en la Figura 2.

Figura 2 : Diagrama del Proceso General de Producción de Minera Escondida Ltda.

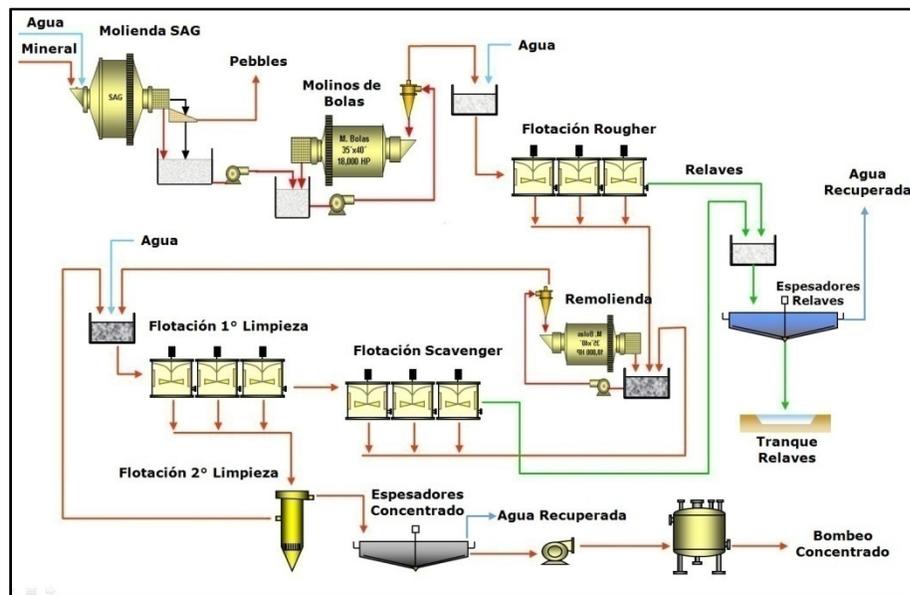


2.2. Descripción del Proceso

El proceso de concentración (Figura 3) ha sido diseñado para procesar los minerales de sulfuros y consta de una etapa de molienda primaria o semiautógena (SAG) que reduce de tamaño del mineral previamente chancado que envía la mina, desde un tamaño máximo promedio de unas 2 pulgadas hasta unos 8 cm de diámetro.

A continuación el material es clasificado en separadores tipo hidrociclón y la fracción de partículas gruesas es enviado al siguiente proceso de molienda de bolas convencional, el cual produce finalmente un producto fino, bajo los 150 micrones, el cual es óptimo para el proceso de concentración por flotación.

Figura 3 : Diagrama del Proceso de Concentración en Minera Escondida Ltda.



En la etapa de flotación, se utilizan las propiedades físico-químicas diferenciadas entre los minerales de cobre útiles y la ganga para producir la separación, incorporando una serie de reactivos químicos. Cuando se inyecta aire al sistema, las partículas de sulfuros de cobre se adhieren a las burbujas, produciéndose el proceso de flotación, cuya espuma representa el concentrado de cobre y lo que no logra las condiciones de mantenerse en la espuma es eliminado como relaves, generalmente sílice y otros materiales sin valor. Dependiendo del objetivo, se tiene la flotación primaria ó Rougher, que busca recuperación de especies útiles y no calidad de concentrado. Mientras que las etapa de flotación Scavenger y de Limpieza persiguen eliminar impurezas y mejorar la ley de cobre en el concentrado, es decir mejorar la calidad del producto final. Para procesar los sulfuros Minera Escondida cuenta con dos plantas concentradoras Los Colorados y Laguna Seca que procesan un total de 250.000 tpd.

2.3. Principales cifras

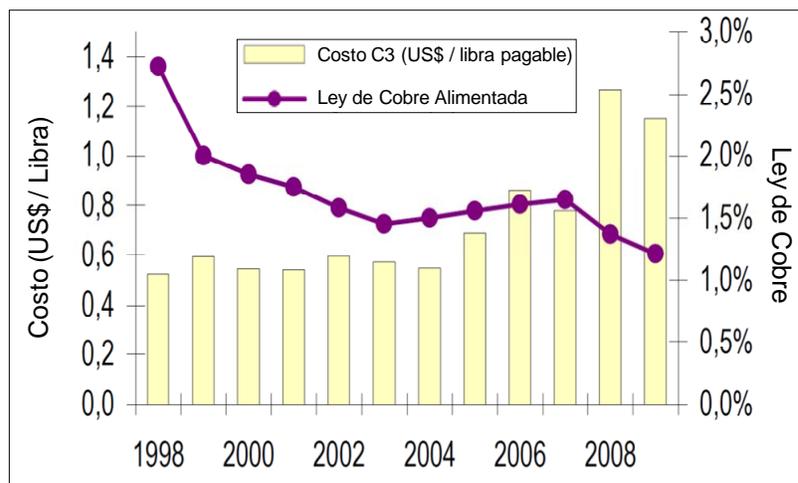
Minera Escondida es la mina de cobre de mayor producción en el mundo. Durante el año 2008, tuvo una participación de 8,11% en la producción mundial de cobre y un 23,56% en la producción de Chile, de acuerdo a informe de Bloomsbury Minerals Economics emitido en enero de 2009. Minera Escondida Ltda. ha mantenido una producción de cobre por sobre un millón de toneladas al año. (Tabla 1)

Tabla 1 : Resumen de Producción y Costos de Minera Escondida Ltda.

	2008	2009	2010
Producción (MTM de Cu Fino)	1.255	1.103	1.087
Precio Bruto de Cobre (US\$/lb.)	3,15	2,34	3,42
Costo Caja Directos C1 (US\$/lb.)	0,77	0,84	0,93
Costo operacional C2 (US\$/lb.)	0,89	0,98	n.d.
Costo unitario total C3 (US\$/lb.)	1,27	1,15	n.d.

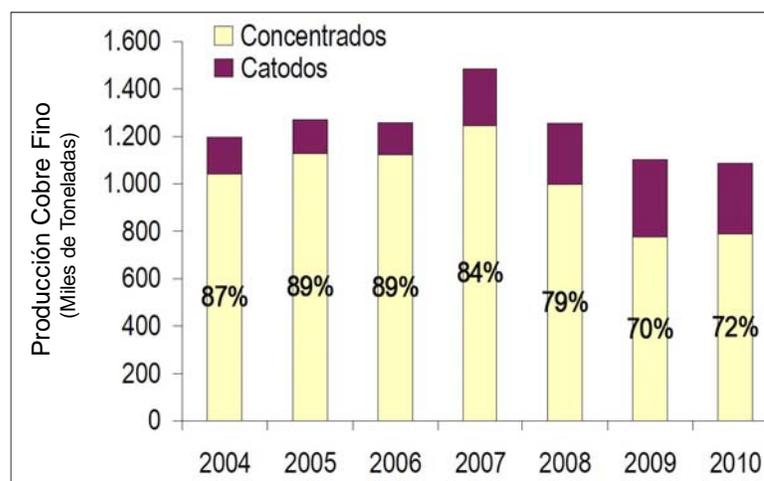
La compañía mueve anualmente del orden de 360 millones de toneladas de mineral mina, sin embargo los niveles de ley de cobre han caído significativamente hasta niveles cercanos al 1 %. Esto puede observarse en la Figura 4.

Figura 4 : Evolución de los niveles de Costos y Ley de Cobre para Minera Escondida Ltda.



Producto de la explotación y procesamiento de los minerales disponibles, Minera Escondida posee dos líneas de productos principales : Concentrado de Cobre, que representa un 72% de las ventas, y cátodos de cobre, el cual representa un 28% de las ventas, ver Figura 5. La capacidad de producción nominal en Minera Escondida es de 3.2 millones de toneladas por año de concentrados de cobre y 330.000 toneladas de cátodos de cobre electro obtenidos.

Figura 5 : Evolución de los niveles de Producción para Minera Escondida Ltda.

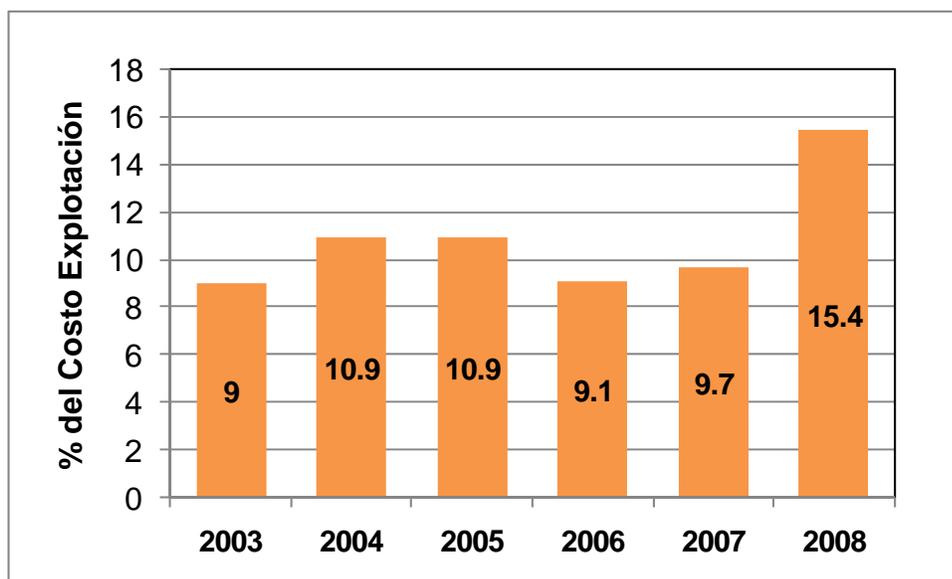


Respecto del consumo eléctrico, ha tenido un incremento del 5,2%, representando un costo asociado de 368 millones de dólares, de los cuales este costo corresponde al 15,4% del costo de explotación de Minera Escondida. (Tabla 2).

Tabla 2 : Consumo Energético Histórico para Minera Escondida Ltda.

AÑO	Producción (kt Cobre)	Coefficiente Unitario (kWh/kt Cu)	Consumo Electrico (GWh)	Gasto (USD Millones)
2003	995	2374	2361	75
2004	1195	2083	2489	104
2005	1272	1979	2516	118
2006	1256	2023	2540	134
2007	1484	2006	2976	188
2008	1255	2493	3129	368

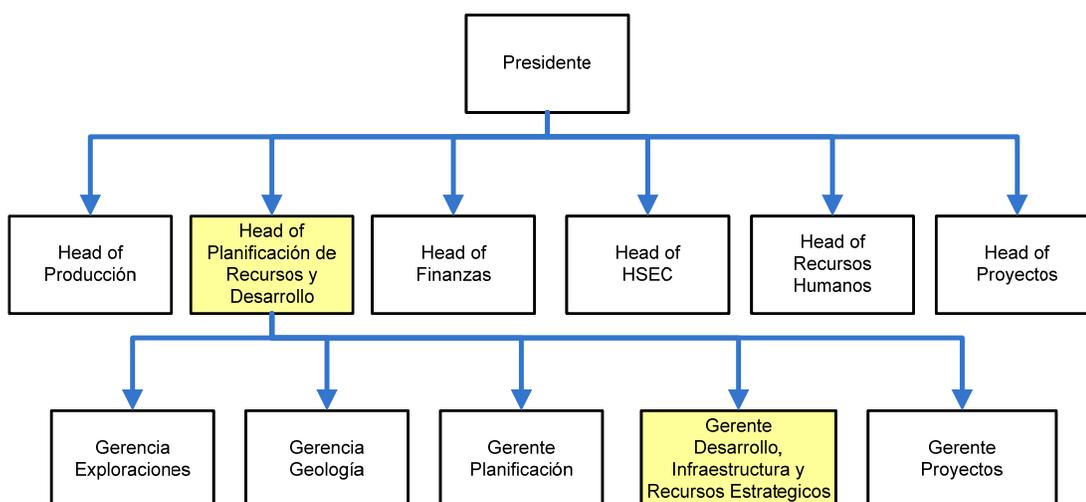
Figura 6 : Gasto Total de Energía en Minera Escondida Ltda. como porcentaje de su costo de explotación



2.4. Estructura organizacional

La estructura de Minera Escondida Ltda. se muestra en la Figura 7 donde se destaca en amarillo la línea funcional en la que se desarrolla el presente caso de estudio, que corresponde a la Head of Planificación de Recursos y Desarrollo, específicamente a la Gerencia de Desarrollo, Infraestructura y Recursos Estratégicos que tiene la responsabilidad de agregar valor a los activos mediante la planificación estratégica de los recursos de la compañía.

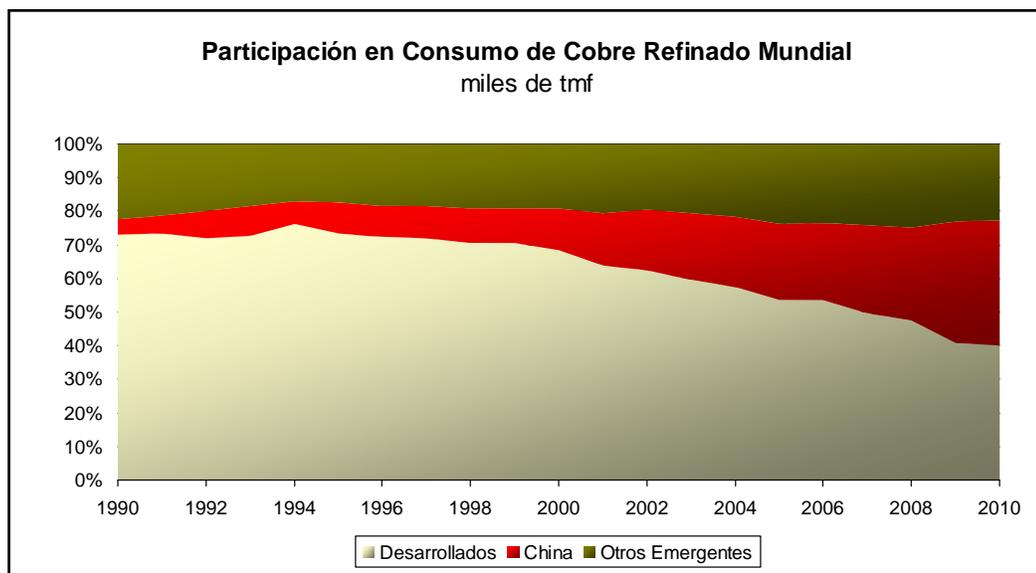
Figura 7 : Estructura Organizacional Ejecutiva Minera Escondida Ltda.



2.5. Descripción del Mercado

A la luz de las proyecciones elaboradas por organismos internacionales como el Banco Mundial y el Fondo Monetario Internacional (FMI) vigentes a fines de 2010, es posible concluir que el ciclo expansivo que está atravesando la economía global desde fines de 2009, principal responsable del auge de la actividad minera reciente, podría expandirse a lo menos por los próximos dos años. Aunque con tasas de crecimiento más moderadas que las que se registraron en 2010, este desempeño seguirá liderado por los mercados emergentes, particularmente por China, cuya producción industrial se estima que continúe avanzando en 2011 y 2012 a un ritmo de dos dígitos.

Figura 8 : Participación de la Demanda por Cobre Refinado



Existe un consenso generalizado entre los analistas económicos, respecto a las perspectivas positivas del mercado del cobre para los productores. Los dos factores más importantes para éstas proyecciones son (i) Una oferta mundial que actualmente es limitada, sin grandes proyectos que impacten la producción en el corto o mediano plazo, y por otro lado (ii) La fuerte demanda de los países emergentes, en especial China, que anticipan para 2012 un mercado deficitario (-199 mil TM), acompañado por una reducción en inventarios en bolsa de metales, reforzando la percepción de que el precio cuenta con un soporte en fundamentos de mercado. Se proyecta que el precio

del metal rojo se ubique en el rango entre 375 centavos/lb y 395 centavos/lb.. En la Figura 8 puede observarse el porcentaje de participación en el consumo de cobre de las principales economías, donde claramente la participación de los países emergentes ha sido importante, desde aproximadamente 30 % hasta casi un 50 %, donde se destaca además la participación de China.

Una de las amenazas en lo inmediato es el alza que se ha producido en China en las tasas de interés. Se espera, sin embargo que en el largo plazo la demanda mundial por cobre se mantenga sólida a través de la demanda de economías emergentes, en especial desde Asia. De acuerdo con estimaciones del Centro de Estudios del Cobre y la Minería (Cesco)¹³, esta capacidad le permitirá a la industria local mantener su participación en la producción internacional del metal rojo en niveles cercanos al 32% en los próximos tres años.

OFERTA DE COBRE

A nivel mundial se proyecta para 2012 un aumento de producción de cobre de mina de 4,5% totalizando 16,9 millones de TM, esto es 732 mil TM adicionales respecto de 2011. Este aumento se fundamenta en una mayor producción de Chile (+506 mil TM,) principalmente por el aporte de expansiones de Los Bronces (+213 mil TM), la recuperación de la producción de Escondida (+232 mil TM) y Andina (+22 mil TM) y del ramp-up de Esperanza (+60 mil TM) y de Los Pelambres (+ 25 mil TM).

En el resto del mundo la mayor producción estaría asociada a China, Indonesia y Congo que aportarían cerca de 327 mil TM más, provenientes principalmente de ampliación de operaciones.

Para el 2013, se prevé un aumento de 757 mil TM de producción asociada a la entrada de nuevas operaciones y el ramp-up de proyectos que iniciaron su operación en años v anteriores. En Chile comenzarían la etapa de producción las operaciones Mina Ministro Hales (+30 mil TM), Caserones (+62 mil TM), entrada a plena capacidad de Esperanza (+40 mil TM) y la Ampliación Los Bronces (+71 mil TM). Asimismo, se prevé que Escondida y Collahuasi sigan recuperando sus niveles de producción.

Tabla 3 : Producción de Cobre de Mina en Miles de Toneladas.

País	2011(e)		2012(e)		2013(e)	
	Prod.	Var.	Prod.	Var.	Prod.	Var.
Chile	5.244	-175	5.750	506	5.956	206
Estados Unidos	1.143	-19	1.227	84	1.388	161
Perú	1.351	-1	1.402	51	1.504	102
China	1.471	112	1.628	156	1.707	79
Australia	920	58	975	55	1.000	26
Federación Rusa	666	-8	694	28	700	6
Canadá	597	100	636	39	635	-2
Indonesia	540	-331	590	50	675	85
Zambia	872	8	1.010	138	1.180	171
Kazakhstan	427	81	444	17	458	15
Polonia	434	9	423	-11	408	-15
México	568	248	642	74	709	67
RD Congo	554	114	687	133	760	73
Irán	278	51	283	6	302	19
Brasil	214	-18	264	50	350	86
Otros	930	-224	993	63	1.200	207
Total	16.209	5	17.648	1.438	18.933	1.285
Pérdidas esperadas			706		757	
Total disponible	16.209	5	16.942	732	18.176	1.234
Var.Porcentual (%)		0,1%	4,5%		7,3%	

Fuente: Copper Bulletin del GIEC y estimaciones de COCHILCO sobre la base de información de Wood Mackenzie, CRU y empresas productoras chilenas.

Notas: (e) Estimado. Las pérdidas esperadas para 2011 corresponden a lo que queda del año.

Para los años 2012 y 2013 se prevé un 4% de pérdidas sobre la producción esperadas, que corresponden a mermas asociadas factores operacionales, climáticos, huelgas, retraso en la puesta en marcha de ampliaciones o proyectos.

DEMANDA DE COBRE

Respecto del año 2012, se considera que la desaceleración de la economía mundial y una esperada recesión en Europa provocarían una baja en la tasa de crecimiento mundial a 2,8%, totalizando 20,6 millones de TM. China seguirá siendo el catalizador principal debido a un crecimiento del consumo de 5,9%. Mientras tanto, se estima que en 2013 la economía global se recupere y suba la demanda de cobre de 3,5%, impulsada por la recuperación de Europa y un mayor consumo de los principales países asiáticos. El total llegaría a 21,3 millones de TM de cobre.

Tabla 4 : Demanda de Cobre Refinado en Miles de Toneladas.

Miles TM	2010	2011 (e)		2012 (e)		2013 (e)	
		Demanda	Var (%)	Demanda	Var (%)	Demanda	Var (%)
China (1)	7.394	7.801	5,5	8.261	5,9	8.765	6,1
Unión Europea (2)	2.989	2.975	-0,5	2.945	-1,0	2.975	1,0
Estados Unidos	1.760	1.790	1,7	1.799	0,5	1.799	0,0
Japón	1.061	1.010	-4,8	1.039	2,9	1.060	2,0
Corea del Sur	828	800	-3,4	804	0,5	834	3,7
Federación Rusa	460	746	62,2	760	1,9	760	0,0
Taipei Chino	533	460	-13,7	430	-6,5	445	3,5
India	626	662	5,8	690	4,2	725	5,1
Brasil	452	410	-9,3	420	2,5	441	5,0
Turquía	379	394	4,0	396	0,5	396	0,0
Principales países	16.482	17.048	3,4	17.544	2,9	18.199	3,7
Resto del mundo	2.904	2.962	2,0	3.021	2,0	3.088	2,2
Total mundial	19.386	20.010	3,2	20.566	2,8	21.287	3,5

Notas: (e) estimado. (1) demanda aparente. (2) demanda aparente para la UE-15 que incluye Austria, Finlandia, Suecia, Bélgica, Grecia, Luxemburgo, Dinamarca, España, Países Bajos, Alemania, Francia, Portugal, Irlanda, Italia y Reino Unido.

Fuente: Elaboración propia sobre la base de datos del GIEC, Brook Hunt, World Metals Statistics y Consensus Forecasts.

BALANCE DE MERCADO

En la Tabla 5 se aprecia que la condición deficitaria del mercado, que prevaleció en 2011 y dio soporte al precio, se mantendría en 2012, por lo que en condición de equilibrio competitivo debiera esperarse una presión alcista del precio del cobre.

En 2013 la situación de mercado cambia a superávit (+246 mil TM), sin embargo, no es de una magnitud que implique un alza significativa de los stocks en bolsa, medido como semanas de consumo. Así, en 2013 el balance del mercado del cobre sigue siendo estrecho, por lo que debiera mantenerse la presión sobre el precio del metal.

Tabla 5 : Balance Proyectado de Mercado.

Miles TM de Cobre Fino	2011 (e)	2012 (e)	2013 (e)
Producción de refinado primario	16.134	16.972	17.944
Producción de refinado secundario	3.711	3.394	3.589
OFERTA TOTAL	19.845	20.367	21.533
Variación Porcentual	3,8%	2,6%	5,7%
DEMANDA TOTAL	20.010	20.566	21.287
Variación año a año	3,2%	2,8%	3,5%
BALANCE	-165	-199	246
Inventarios como semanas de demanda	1,5	1,2	1,4

Fuente: Elaborado por Cochilco, sobre la base de antecedentes de GIEC, Brook Hunt, CRU y empresas productoras.

Nota: (e) Estimado

3. DESCRIPCIÓN DEL TEMA

3.1. Resumen

La revisión de los planes mineros de largo plazo en Minera Escondida Ltda. muestran una importante disminución en la razón de procesamiento esperado hacia concentradoras, los impactos directos de ésta disminución se identifican en los siguientes elementos:

- Producción, ya que el flujo de cobre producido es una relación directa entre el tonelaje procesado, el contenido del metal en el mineral y las características metalúrgicas.
- Costo de Operación, ocasionado por un incremento del nivel de consumo de energía requerido para procesar el mineral futuro.

Además es posible identificar otros efectos indirectos sobre:

- Impuestos por Emisiones de CO₂, el cual se incrementa en la medida que se utiliza mayor energía en los procesos de conminución.
- Reservas Disponibles, desde el punto de vista de la planificación minera las restricciones de procesamiento afectan fuertemente el nivel de reservas disponibles, ya que impactan sobre el costo de oportunidad de los materiales.

Es posible observar que la disminución de producción tiene una relación directa con el aumento de los indicadores de dureza que exhiben los minerales a ser alimentados en los procesos de concentración. Todos los estudios y estimaciones futuras proyectan un efecto negativo de la dureza sobre el rendimiento esperado de procesamiento, si se toma como base la configuración del circuito actual de molienda en ambas plantas concentradoras de Minera Escondida Ltda. que es del tipo Molienda SAG + Molienda de Bolas.

El escenario futuro para Minera Escondida motiva la evaluación económica de alternativas energéticamente más eficientes, respecto del diseño actual de Molienda SAG / Molienda de Bolas. Es absolutamente deseable que éstas alternativas de conminución estén probadas industrialmente y disponibles en el mercado.

4. OBJETIVOS Y RESULTADOS ESPERADOS

4.1. Objetivo general

Mejorar los niveles de producción y el uso de energía utilizada en las etapas de conminución en concentradoras, respecto de las actuales estimaciones, las que están basadas en la configuración molienda SAG y Molienda Convencional, mediante la incorporación de alternativas tecnológicas.

4.2. Objetivos específicos.

Los objetivos específicos que se buscan como parte del estudio son:

- Definir estrategias organizacionales que permitan incorporar la alternativa tecnológica a implementar.
- Analizar la opción de tecnologías más eficientes en consumo de energía, alineadas con la estrategia medioambiental de la compañía y evaluar la reducción de emisiones de CO₂ que pueden conseguirse producto de la implementación

4.3. Resultados esperados

15 % de Incremento en Niveles de Procesamiento

10% - 20 % de Reducción en Consumo Energético

5. ANTECEDENTES

5.1. Fundamentos de Conminución

Se denomina conminución a la serie de operaciones unitarias y procesos mediante los cuales una cantidad de mineral se reduce de tamaño hasta lograr un tamaño específico. Esta reducción de tamaño se logra aplicando la energía necesaria para romper las partículas. Dependiendo de la forma de aplicación de la carga y de la mecánica de la fractura de las partículas, se obtendrá un mecanismo de falla característico y una distribución granulométrica propia.

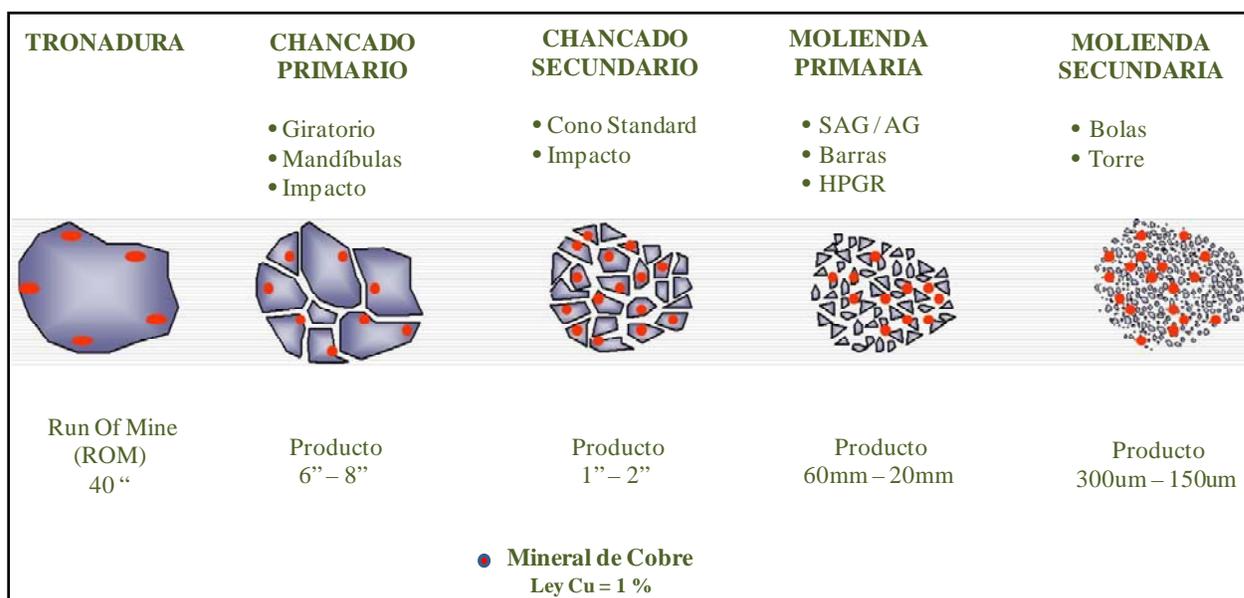
5.2. Objetivo de los Procesos de Conminución

La explotación minera, en la forma de mineral Run of Mine no es uniforme en lo que respecta a su composición y presenta un tamaño medio de partícula demasiado grueso e inestable para su transporte y manipulación. Por otro lado, una de las características de la mineralización en los pórfidos de cobre es la disseminación, ésta se identifica cuando el tamaño promedio de los granos de las especies minerales útiles son menores que 75 micrones. El conocimiento de la forma y grado de disseminación es de importancia primordial en el proceso de conminución ya que este dato indicará el tamaño a que deberá ser molido el mineral para que las especies mineralógicas sean liberadas de la ganga que la acompaña, el grado de liberación de las especies útiles es el requisito fundamental para aplicar un método físico de concentración. Luego, los objetivos de la conminución, son:

- Generar partículas de tamaño y forma adecuadas para los procesos posteriores, ya sea transporte, apilamiento o separación física ó química.
- Liberar los materiales valiosos de la ganga de modo que ellos puedan ser concentrados.
- Aumentar el área superficial disponible para reacción química.

Si nos centramos en los procesos de concentración por flotación, en general se tiene el siguiente diagrama secuencial de etapas de conminución :

Figura 9 : Operaciones Unitarias de Conminución en un proceso típico de Concentración.



La conminución en las operaciones mineras normalmente implica reducir grandes rocas de hasta 1 m hasta partículas menores que 25 micrones o menores. Sin embargo, la mayor parte de la energía utilizada en la industria (89 %) se utiliza cuando se reduce desde 20 mm hasta 100 micrones. Es decir, si nos remitimos a la clasificación propuesta por R.T. Hukki, mostrada en la Tabla 6, podemos observar que este rango de partículas de alto consumo energético está asociado a las etapas de molienda.

Tabla 6 : Tamaños Característicos de Partículas en Alimentación y Producto de acuerdo a la etapa de conminución correspondiente.

Etapa de Reducción de Tamaño	Tamaño Alimentado	Tamaño Producto
Tronadura	Infinito	1 m
Chancado Primario	1 m	100 mm
Chancado Secundario	100 mm	10 mm
Molienda Primaria	10 mm	1 mm
Molienda Secundaria	1 mm	100 micrones

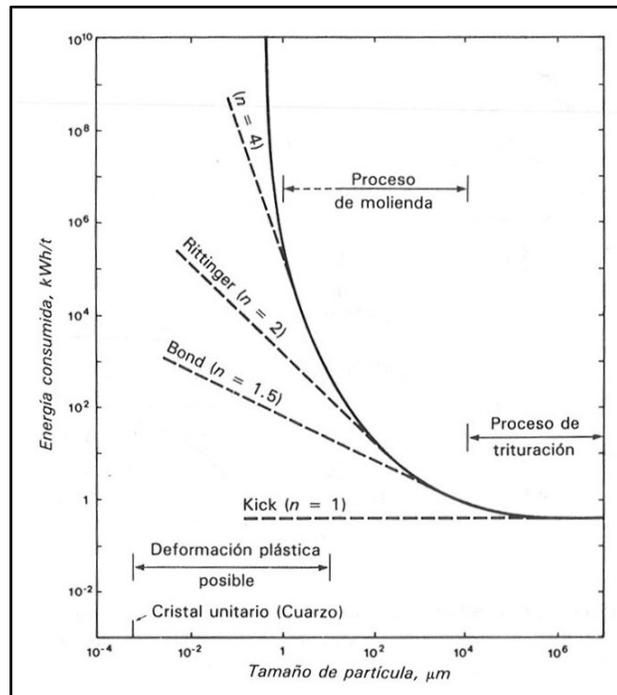
5.3. Relación entre Energía y Tamaño de Partícula

La relación entre la energía necesaria para la fractura y el tamaño de partícula ha sido estudiada desde el siglo pasado. La ecuación genérica propuesta por Walter et al es la siguiente:

$$dE = -C \frac{dX}{X^n}$$

donde E es la energía específica neta; X es el tamaño de partícula característico; n es un exponente y C es una constante relacionada a las propiedades del material. La ecuación anterior establece que la energía requerida para reducir de tamaño un material es proporcional al cambio de tamaño e inversamente proporcional al tamaño amplificado por n veces.

Figura 10 : Relaciones Energía-Tamaño de Partícula de acuerdo a la ecuación de Walker et al.



La importancia de las relaciones entre los procesos de conminución y el consumo de energía, es que introduce el parámetro conceptual del índice de trabajo (W_i) del material sometido al proceso de reducción de tamaño. Esta relación es ampliamente utilizada en el diseño de los procesos y en el dimensionamiento de equipos que incluyen éste parámetro en sus cálculos.

5.4. Indicadores de Dureza y Consumo de Energía

Como hemos mencionado anteriormente, la cantidad de energía necesaria para fracturar y moler el mineral está relacionada con el tamaño de partícula requerido y con la dureza de la roca. Inherente al propósito técnico de éstos procesos existe un fundamento económico que sustenta la reducción de tamaño, ya que por una parte se busca maximizar la recuperación de las especies de valor en el proceso y por otro lado se busca minimizar los costos de operación, de los cuales el consumo energético es un ítem importante en la industria chilena. Por ésta razón, se hace necesario determinar y predecir el rendimiento y consumo energético de los minerales que se alimentarán al proceso.

La resistencia del mineral a la fractura (o dureza) se mide a través de pruebas de moliendabilidad. Diversas pruebas de moliendabilidad han sido desarrollados a través de los años para diferentes aplicaciones y cada prueba tiene sus propias fortalezas y debilidades, por lo que la elección es un compromiso entre el costo de la prueba y la información que entrega. Debido a que una gran parte de la componente del costo está asociada a los requerimientos de muestras, los test que pueden ser realizados utilizando muestras de sondajes tienen una ventaja significativa sobre aquellas pruebas que requieren una masa considerable y un diámetro de partícula muy grande.

A continuación se presenta brevemente una descripción de los test más utilizados para diseñar, pronosticar, evaluar y monitorear los circuitos de molienda SAG y molienda convencional en la industria del cobre.

SAG Power Index (SPI)

Se expresa en minutos, y se define como el tiempo necesario para reducir una muestra de mineral desde un tamaño característico (F80) de ½” hasta un tamaño característico de producto (P80) de 1,7 mm. Un tiempo de molienda mayor, respecto de la media de la distribución de datos capturados del depósito, indica mayor resistencia a la molienda, es decir un mineral duro. Junto al test se entrega una distribución del tamaño del producto, a partir de la cual el tamaño P64 se usa como indicación del tamaño de producto que el molino AG / SAG podría entregar.

Este parámetro se puede transformar en kWh/t usando una relación específica dada por el proveedor de esta tecnología. El SPI tiene la ventaja de requerir poca masa (~5 kg) y, entonces, resulta adecuado para la caracterización geometalúrgica de los depósitos.

Índice de Trabajo de Bond para Molinos de Bolas (BWI)

Esta prueba se realiza de acuerdo al procedimiento original de Bond y se expresa en kWh/t. Para ello, se utilizan 10 kg de mineral, y el objetivo es alcanzar el estado estacionario, en términos de la razón de reposición de mineral fresco al molino equivalentes a los gramos generados/ revolución. Esto para un cierto número de ciclos de molienda. Cada ciclo tiene 100 revoluciones, y se utiliza un tamiz con una abertura dada para definir la malla de corte del producto en cada ciclo. Es una prueba mundialmente aceptada, en términos de sus confiabilidad, repetibilidad y reproducibilidad para el diseño y análisis de circuitos de molienda de bolas. En la Tabla 7, se observan los valores del Índice de Trabajo de Bond, BWi, para distintas calidades de roca.

Tabla 7 : Valores Típicos de Bond Work Index para distintos minerales, Bond 1961.

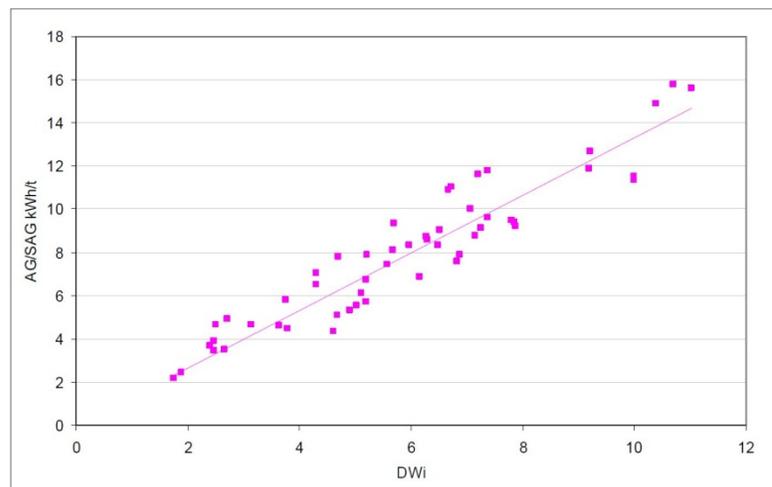
Material	Bond Work Index (kWh/t)
Barita	7.6
Arcilla	8.6
Dolomita	13.7
Carbón Mineral	13.8
Caliza	14.1
Feldespato	14.2
Cuarzo	15.5
Mineral de Cobre	15.9
Granito	17.4
Mineral de Hierro	18.7
Basalto	24.7

Estas dos pruebas (SPI y BWI) son las que Minera Escondida utiliza de manera rutinaria para la caracterización de los minerales futuros insertos en el proceso de planificación actual y el diseño de sus proyectos.

Drop-Weight Test (DWi)

Esta prueba fue desarrollada por JK Tech en Australia y requiere 75 kilos de mineral, el cual se prepara para generar 30-90 partículas en 5 fracciones, en el rango desde 13,2 mm hasta 63 mm. Durante la prueba, las 5 fracciones se someten a tres pruebas de impacto a diferentes niveles de energía. Así, se efectúa un total de 15 pruebas de impacto. En la Figura 11 se muestra a modo de ejemplo, la relación entre el parámetro de dureza DWi y el consumo de energía específico en un circuito de molienda AG/SAG expresado en kWh/t .

Figura 11 : Relación entre DWi y Consumo de Energía Específico para circuitos AG/SAG.

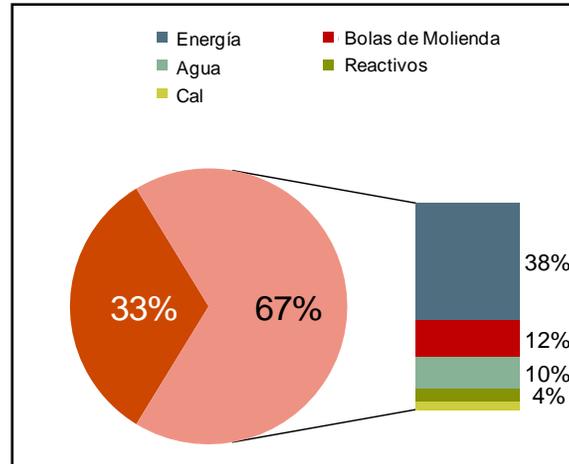


Una consecuencia directa de esta relación energía/dureza para una configuración de circuito del tipo Molienda Semiautógena (SAG), es que la capacidad de procesamiento de mineral se ve impactada significativamente por la variabilidad de este parámetro, lo que impide obtener los niveles de producción instalados cuando se procesa roca de alta dureza.

Como se ha mencionado, el uso de energía eléctrica utilizada en los procesos de conminución, representa un 0,56 % del total mundial de consumo neto anual equivalente a 87 TWh. De este consumo de energía, el 53 % es utilizado en la industria del cobre, donde el consumo de energía en conminución representa el mayor componente del costo de capital y operacional asociado a la producción. Por ejemplo, para Minera Escondida el costo de energía representa cerca del 15 % de su costo de explotación. Si consideramos que para una planta típica de pórfidos de cobre, la energía representa casi un 40 % del total del costo variable un mejoramiento de la

eficiencia energética en los procesos de conminución tendrá un impacto significativo en el costo operacional.

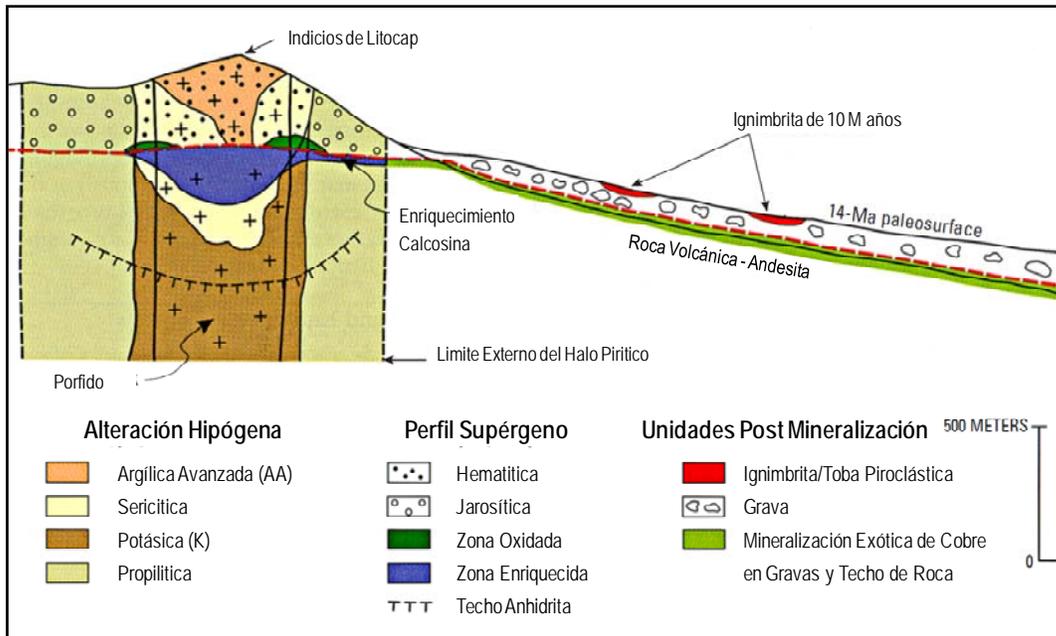
Figura 12 : Distribución del Costo variable en un Concentrador típico de pórfidos de cobre.



5.5. Dureza en los Depósitos de Cobre Porfídicos

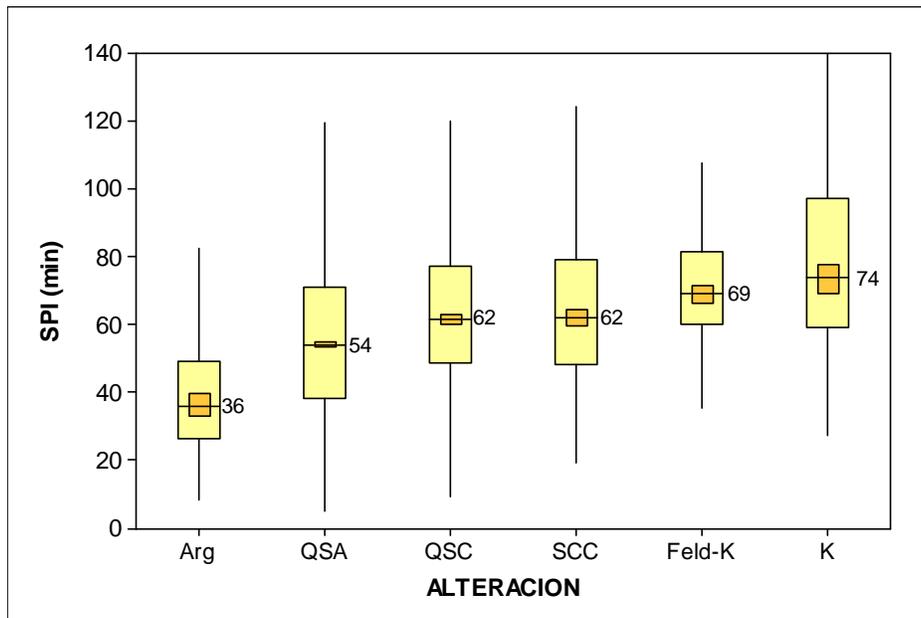
Los yacimientos de cobre en Chile asociados a la gran minería, como Escondida y Escondida Norte, son del tipo porfídicos, éste tipo de depósitos está conformado por minerales de cobre diseminados y minerales de cobre en vetas y brechas distribuidas de modo relativamente uniforme en grandes volúmenes de roca, dando origen a grandes tonelajes de mineralización. Producto del origen volcánico de éstos depósitos, se pueden distinguir diferentes tipos de alteración asociadas con las zonas mineralizadas, como se puede observar en la Figura 13, entre ellas podemos mencionar como principales la alteración argílica avanzada, sericítica, y potásica. En el esquema mostrado, el enriquecimiento de calcosina está generalmente asociado a la alteración sericítica, mientras que los sulfuros hipógenos se relacionan principalmente a la alteración potásica. Esta correspondencia es importante y se debe tener en mente, ya que explica el incremento de mayor uso energía en la medida que profundizamos la explotación de los yacimientos del tipo pórfido.

Figura 13 : Esquema General en Depósitos de Cobre Porfídicos.



La Figura 14 muestra el incremento que experimenta el parámetro SPI en la medida que la alteración tiende hacia zonas profundas de los depósitos porfídicos Escondida y Escondida Norte.

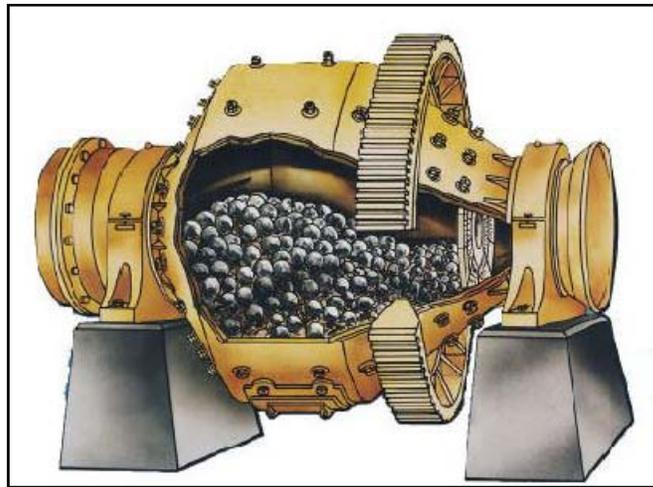
Figura 14 : Datos de Dureza (SPI) hacia zonas profundas en Escondida y Escondida Norte.



5.6. Molienda Semi Autógena (SAG)

En este proceso, el mineral se alimenta a un molino rotatorio directamente desde el chancador primario (no existen etapas de chancado previo como en la molienda convencional). El mineral se reduce de tamaño debido al efecto combinado del mismo mineral (de ahí su nombre de molienda semiautógena) y de bolas de acero de aproximadamente unas 5 pulgadas de diámetro. , las bolas de acero, son lanzadas en caída libre logrando un efecto de trituración por impacto. El volumen interno utilizado por las bolas de acero es aproximadamente un 12 %. La Figura 15 muestra un esquema del equipo.

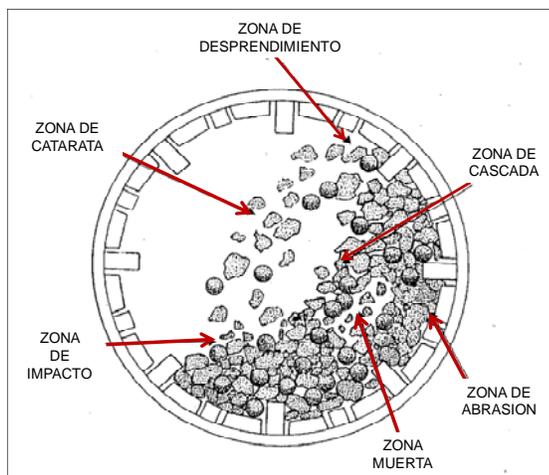
Figura 15 : Esquema de molino Semiautógeno



En el proceso de molienda SAG debido a la rotación, el gran diámetro del equipo y los elementos levantadores (lifters), el material es elevado por las paredes internas hasta el punto en que la gravedad promueve una caída parabólica de la carga. Se produce, entonces, una cascada continua que impacta con el mineral en la zona inferior del molino.

Hasta hoy, en la industria minera del cobre, la molienda semiautógena (SAG) ha sido seleccionada como la alternativa más eficiente en la reducción del tamaño de minerales, debido a su alta capacidad de procesamiento contrapuesto con el espacio físico requerido, así como la baja inversión y costo de mantenimiento, por estas razones posee enormes ventajas comparativas respecto a los circuitos convencionales de molienda.

Figura 16 : Dinámica Interna en un molino Semiautógeno

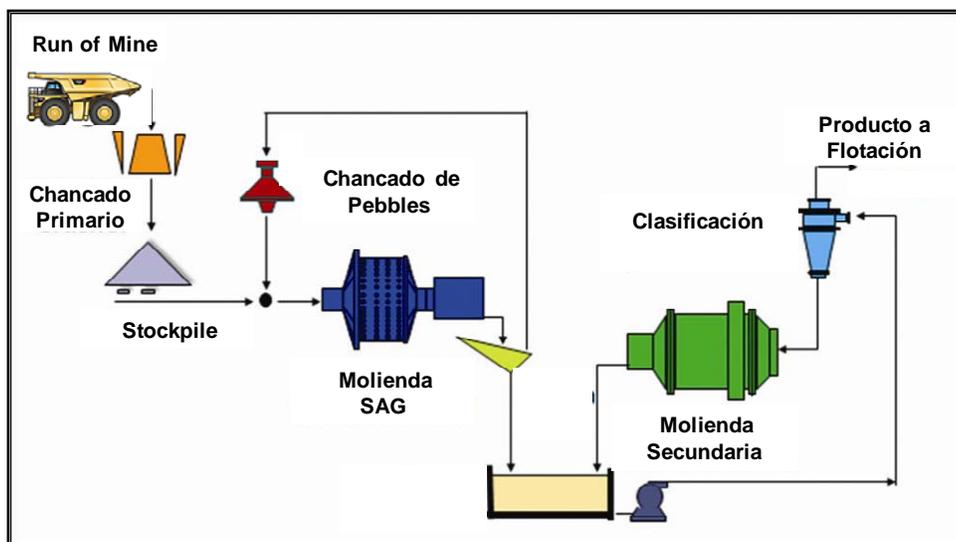


Actualmente se encuentra en el apogeo de su desarrollo, con molinos cada vez más grandes y con una mayor potencia instalada. El conocimiento operacional está aumentando considerablemente gracias al paulatino abandono de conceptos provenientes de la molienda convencional para dar paso a un nuevo conocimiento sustentado en la comprensión de variaciones de la composición y movimiento de la carga. Sin embargo, este mismo conocimiento indica que probablemente las condiciones óptimas de funcionamiento de los molinos semiautógenos necesiten ser revisados, así como los conceptos de diseño del equipo y del circuito del cual forman parte.

En Chile, desde 1981, han entrado en operación 21 circuitos de molienda semiautógena. El molino semiautógeno más grande en operación en Chile es de 36 pies de diámetro y 17.25 pies de largo con una potencia de 13,500 kW.

El diseño del circuito de conminución en Minera Escondida para la línea de sulfuros a concentradoras, tiene la configuración mostrada en la Figura 17.

Figura 17 : Configuración del Circuito de Conminución en el Proceso de Concentración en Minera Escondida.



El proyecto de expansión de Minera Escondida implica la instalación de un molino SAG de 40 pies de diámetro y 26 pies de largo con una potencia instalada de 24,000 kW, mientras que los 4 molinos de bolas que complementan el circuito tienen un diámetro de 26 pies y 42,5 pies de largo, con una potencia instalada de 15,700 kW cada uno. Por su parte CODELCO Chile División El Teniente considera un molino semiautógeno de 38 pies de diámetro y 24 pies de largo con una potencia de 18,000 kW además de dos molinos de bolas de 24 pies de diámetro por 34 pies de largo con 10,000 kW de potencia instalada cada uno. Así, la tendencia de la industria del cobre es utilizar cada vez molinos SAG con mayor capacidad y potencia instalada, sin embargo éste crecimiento tiene limitantes dadas por la capacidad de construir motores que puedan proporcionar niveles mayores de potencia y que sean capaces de asegurar una operación estable y segura.

5.7. Factores que Afectan el Rendimiento en Molienda SAG

Dentro de los factores que tienen un impacto en el rendimiento del molino se pueden mencionar los más importantes a continuación:

- Granulometría de Alimentación
- Dureza del Mineral
- Nivel de Carga de Bolas

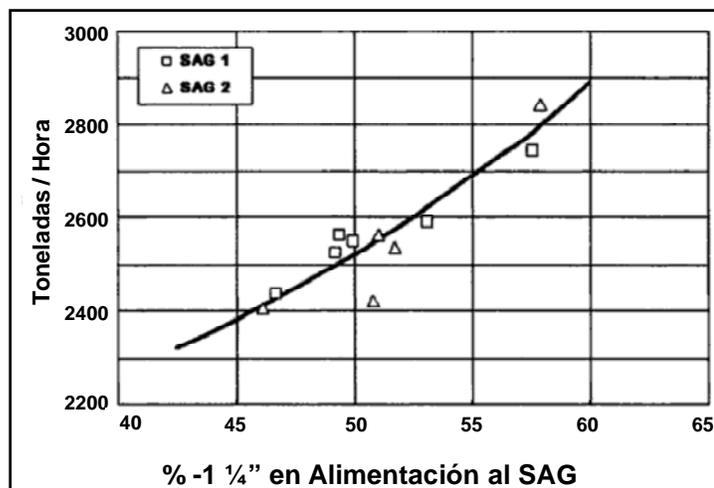
- Abertura de Parrillas de Descarga
- Velocidad de Rotación
- Densidad de Pulpa
- Diámetro de Bolas
- Diseño de los levantadores de carga

Sólo se profundizará en las variables más importantes relacionadas con el estudio de caso abordado por el presente documento.

Granulometría de la Alimentación

La distribución de tamaños de partícula alimentados y la dureza son variables que están relacionadas y dependen de las características de la roca alimentada a los procesos de molienda. Por esta razón es poco frecuente que los efectos de ambas variables sobre el rendimiento de la molienda SAG puedan observarse por separado. Esto se debe a que las rocas duras tienden a generar 2 efectos naturales: (i) Producen una mayor proporción de partículas gruesas partiendo desde la tronadura hasta la alimentación del molino, y (ii) Se genera una mayor segregación en los stockpiles de alimentación al proceso de concentración, lo que complica el manejo de materiales para alcanzar el perfil granulométrico deseado u óptimo. Por lo tanto, el análisis presentado a continuación deberá ser considerado como una combinatoria de ambas situaciones.

Figura 18 : Efecto de la Granulometría sobre el Rendimiento de la Molienda SAG.



Dureza del Mineral

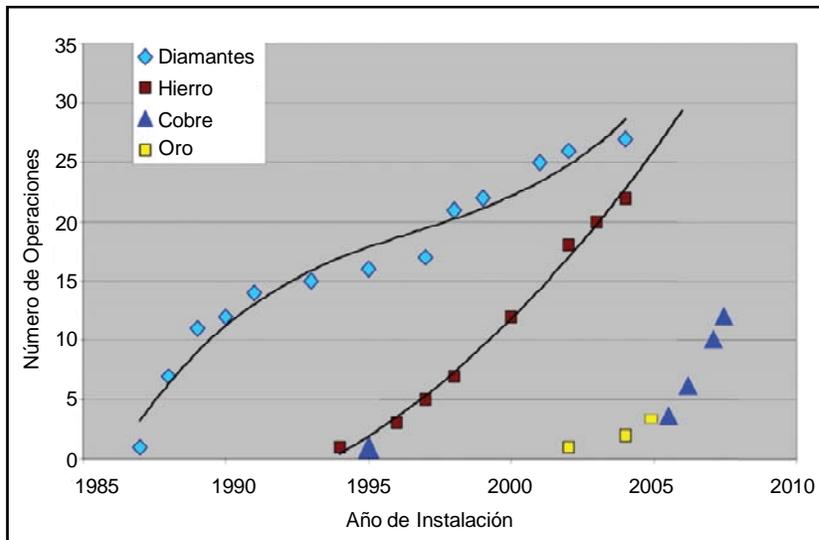
La dureza del mineral que se alimenta al molino, es algo sobre lo cual el operador no tiene control. Mientras más duro es el mineral, mayor será el tiempo que toma su reducción de tamaño, por esto, para un flujo de alimentación constante, el volumen de la carga aumentará junto con la dureza del mineral. Si el molino está siendo operado con un tonelaje inferior a su capacidad máxima, al aumentar el volumen de su carga consumirá más potencia y el cambio en la dureza se compensará con un aumento del consumo de energía por tonelada de mineral fresco, sin embargo si el molino está siendo operado a su máxima capacidad, un aumento de la dureza, producirá un sobrellenado que sólo podrá ser compensado con una disminución del flujo de alimentación. Cuando no existen problemas de segregación del mineral de alimentación, las variaciones en la granulometría pueden considerarse indicadoras de la dureza relativa del mineral, correspondiendo al mineral más duro una granulometría con mayor proporción de gruesos.

5.8. Molinos de Rodillos de Alta Presión - HPGR

La tecnología de Molienda con Rodillos de Alta Presión HPGR (High-pressure grinding roll en Inglés), fue introducida por primera vez a escala industrial a mediados de los ochenta en la industria del cemento. Con el tiempo, y a pesar de las dificultades experimentadas en muchas operaciones debido a esta nueva tecnología, el HPGR probó rápidamente ser una opción muy económica para los procesos de conminución debido a sus bajos consumos energéticos y a la fácil integración con los procesos convencionales para el mejoramiento de los niveles de procesamiento.

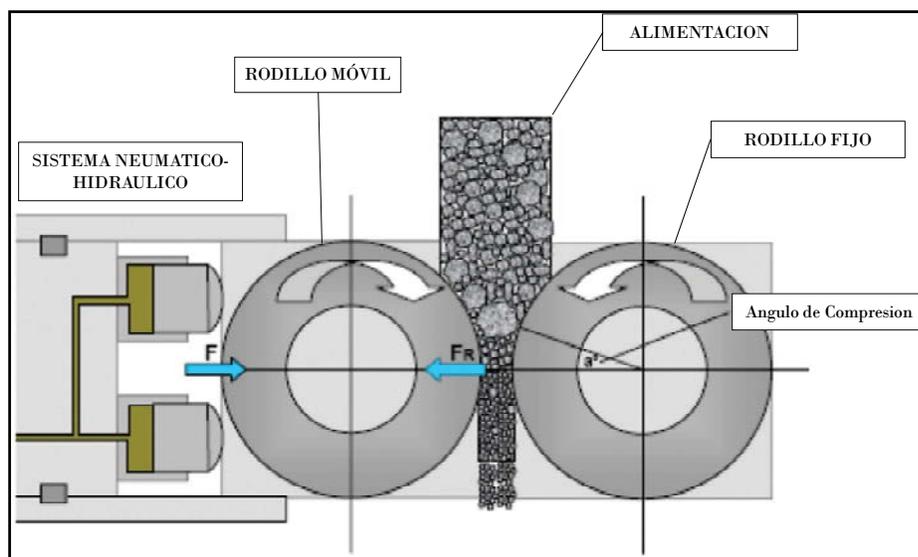
Hoy en día es utilizado en muchas aplicaciones en la industria minera, incluyendo cobre (ver Figura 19), con la finalidad de reducir el consumo de potencia, incrementar la producción y agregar capacidad a los circuitos de molienda existentes.

Figura 19 : Crecimiento de la aplicación de HPGR en la Industria Minera



El molino HPGR consiste de un par de rodillos que giran en sentido contrario, los que están montados sobre una resistente estructura. Uno de los rodillos está fijo a la estructura, mientras que el otro está dispuesto sobre rieles y puede ser regulado mediante pistones neumohidráulicos. La alimentación se introduce entre la abertura de ambos rodillos y es triturada a través del mecanismo de fracturamiento entrepartículas.

Figura 20 : Principio de Conminución del Molino de Rodillos de Alta Presión HPGR.



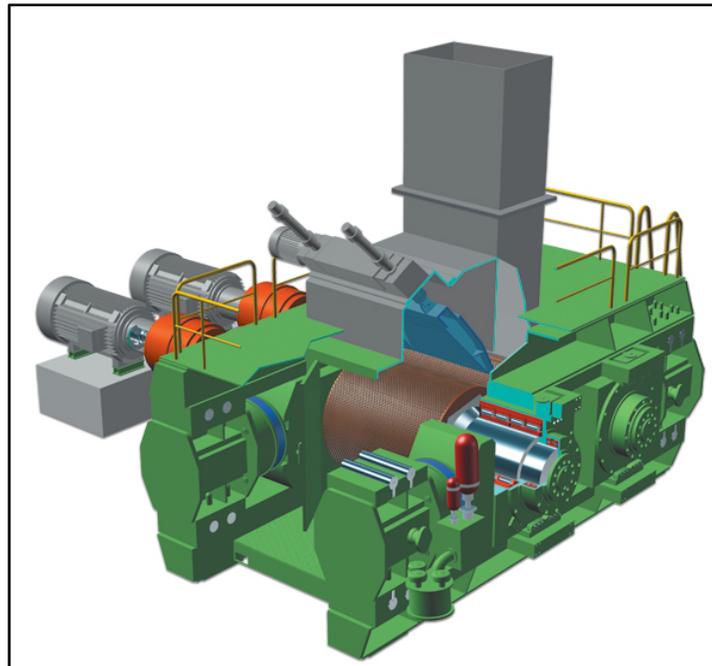
La presión ejercida por el sistema hidráulico del rodillo móvil es el principal factor que determina el rendimiento de la conminución. Las presiones de operación, se

encuentran en un rango típico de 5 - 10 MPa, sin embargo, puede llegar a ser tan alta como 18 MPa. En los equipos más grandes, esto significa una fuerza mayor que 25.000 kN. Los rodillos están protegidos por revestimientos resistentes a la abrasión, mientras que el mineral se mantiene dentro de la abertura por placas instaladas en los ejes.

La capacidad de un HPGR es función de las características del mineral. La capacidad generalmente se expresa en términos del throughput específico $m\text{-dot}$, que es una función del diámetro del rodillo, largo del rodillo y la velocidad periférica.

$$m\text{-dot} \text{ (t}\cdot\text{s/m}^3\cdot\text{h)} = \text{throughput (t/h)} / (\text{diámetro (m)} \times \text{largo (m)} \times \text{velocidad (m/s)})$$

Figura 21 : Esquema de un Molino HPGR.



El valor de $m\text{-dot}$ (rendimiento) se determina mediante pruebas piloto y se escala a nivel industrial tomando en cuenta el cambio de las proporciones relativas del producto desde el centro de los rodillos y desde los bordes donde ocurre una menor reducción de tamaño. Además de su relación fundamental con las características del mineral, el valor de $m\text{-dot}$ es función de muchas variables. Las siguientes deben ser consideradas como tendencias generales para la mayoría de los minerales, en vez de declaraciones o hechos universales:

- Dureza del Mineral : $m\text{-dot}$ aumenta con la dureza del mineral.
- Presión Específica : $m\text{-dot}$ disminuye ligeramente con un incremento en la presión.
- Superficie de los Rodillos : $m\text{-dot}$ aumenta al aumentar la "textura" de la superficie de los rodillos, debido a que se reduce el deslizamiento (aumento de la fricción cinética) y se mejora la mordedura entre los rodillos. Rodillos suaves muestran los menores valores, mientras que los rodillos con protuberancias tienen un 50 % más de rendimiento que los lisos.
- Velocidad de los Rodillos : En general, $m\text{-dot}$ aumenta con la velocidad del rodillo, sin embargo, para rodillos suaves en la medida que se aumenta la velocidad aumenta también el deslizamiento, por lo que este efecto es mucho mayor en rodillos texturados.
- Tamaño Máximo de Partícula en Alimentación: La evidencia disponible no es concluyente, pero al parecer $m\text{-dot}$ disminuye levemente al incrementarse el tamaño.
- Tamaño Mínimo de Partícula en Alimentación: $m\text{-dot}$ disminuye significativamente en la medida que el tamaño mínimo aumenta.
- Humedad de la Alimentación: A niveles de humedad mayores que 1 %, $m\text{-dot}$ disminuye al aumentar la humedad. Altos niveles de humedad originan un incremento significativo del deslizamiento.

La tecnología HPGR, como se ha comentado anteriormente es relativamente nueva principalmente en la industria del cobre, en la cual tuvo su primera incorporación a nivel industrial el año 2006, con la planta concentradora de Cerro Verde en Arequipa, Perú y es de la cual se maneja mayor información. Por esta razón es limitada la base de datos con la que se puede contar a nivel industrial, aunque, se han desarrollado varios proyectos en los cuales se analiza la posibilidad de incorporar un molino HPGR en lugar de un SAG, en un circuito de conminución.

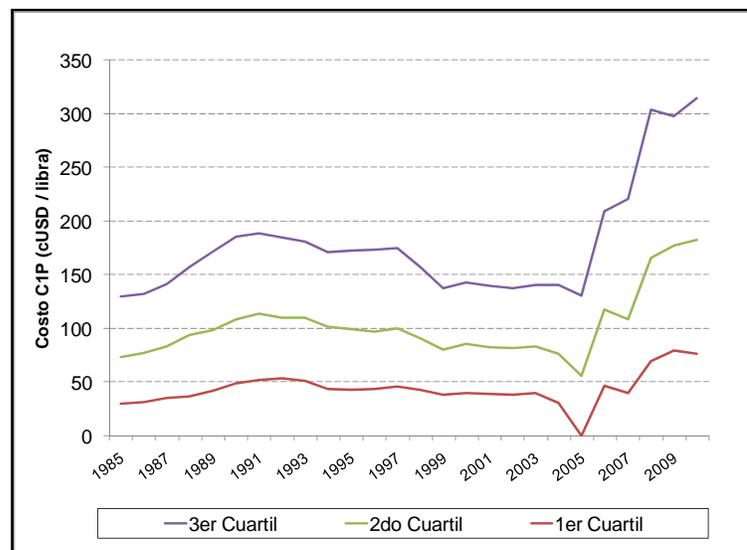
6. ESTUDIO DE CASO - CONTEXTO

La industria del cobre se encuentra actualmente en un periodo de condiciones favorables de mercado, con altos precios y alta demanda de commodities desde las economías asiáticas emergentes. Sin embargo, en el mediano y largo plazo la industria, en especial la industria chilena, enfrenta múltiples desafíos, que deben ser abordados desde hoy, con la finalidad de mantener la competitividad en el mercado. A continuación se presentan aquellos que motivan el presente caso de estudio.

6.1. El Incremento de los costos de Operación.

El costo de operación (C1) de las principales empresas de cobre en Chile, Codelco y Escondida, se incrementó en un 77% y 27% entre 2007 y 2008, respectivamente. Según datos del CRU, centro de estudios privado especializado en minería, los costos de producción en Chile el 2011 aumentaron 24% respecto de 2010; es decir, desde 0,81 US\$/libra hasta 1,06 US\$/libra. En este escenario, una caída en los precios del cobre impactará fuertemente en los ingresos por ventas, y por lo tanto en los beneficios económicos de la industria.

Figura 22 : Evolución del Cash Cost Directo (C1P) de acuerdo a los cuartiles de la industria.



Dentro de las principales causas de este incremento están :

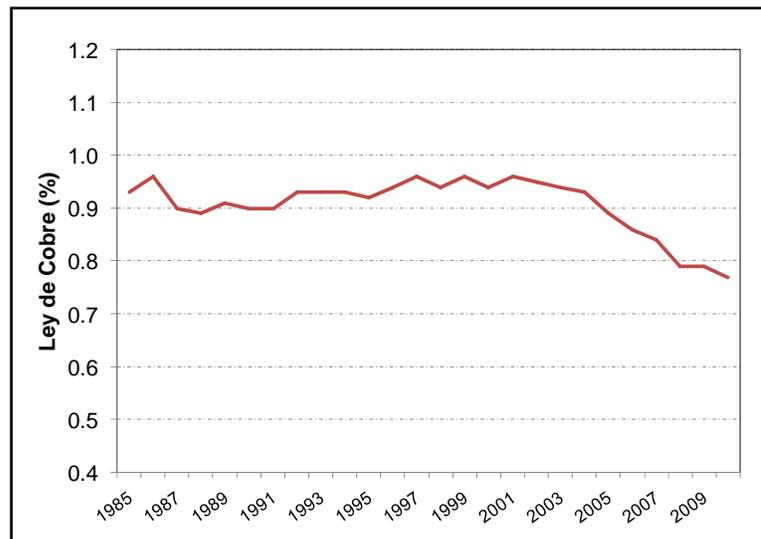
- La disminución de las leyes en los depósitos en explotación, e Incremento de los consumos energéticos por aumento en la dureza de los minerales.
- El aumento en el precio de los insumos, tal como agua, energía y acero.
- El incremento en los sueldos, debido a la escasez de mano de obra.

Disminución de las Leyes e Incremento del Consumo Energético

Los yacimientos de cobre a nivel mundial muestran una disminución sostenida de las leyes de cobre alimentada a los procesos de beneficio de minerales, como lo muestra la Figura 23. Los efectos inmediatos de esta disminución se traduce en un aumento de la relación lastre-mineral, por lo tanto para mantener los niveles de de producción las compañías mineras necesitan (i) mover un mayor volumen de roca estéril para obtener una tonelada de mineral, (ii) alimentar un mayor volumen de mineral al proceso, e (iii) Incrementar los costos de transporte al aumentar la distancia en la medida que se profundiza la mina.

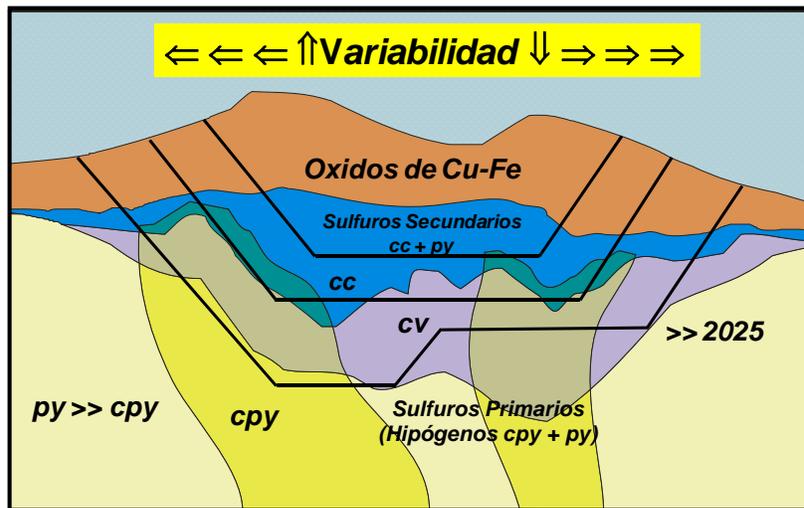
Todos estos impactos se resumen en un incremento del costo operacional, y por lo tanto, una disminución del beneficio económico de las empresas.

Figura 23 : Deterioro de las Leyes de Cobre de la Industria



Otro de los factores ligados a la madurez de los depósitos es el incremento en los índices de dureza de la roca, el cual es producto del desarrollo natural de los pórfidos de cobre. Debido a que los recursos minerales son heterogéneos y poseen propiedades físicas, químicas y mineralógicas variables, inevitablemente el mineral procesado en los primeros años es diferente al procesado en los últimos años.

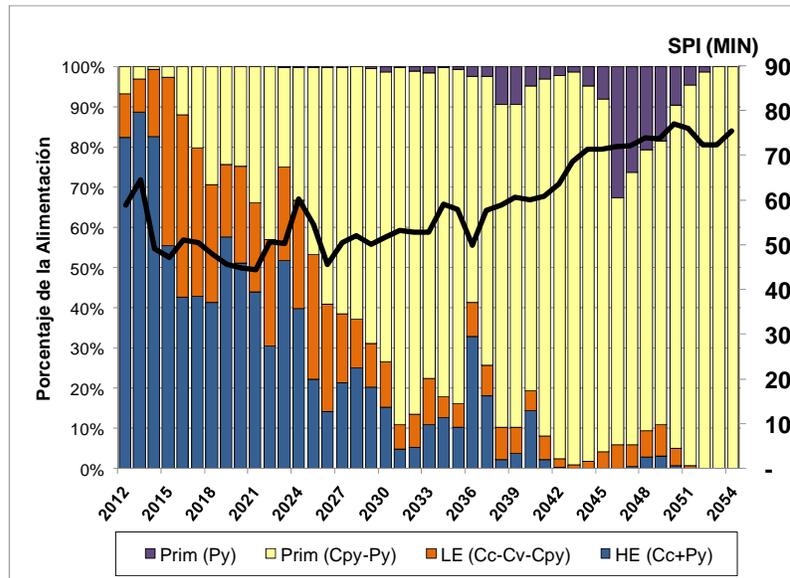
Figura 24 : Esquema de la Evolución de la explotación de las zonas de mineralización en un Pórfido de Cobre hacia minerales hipógenos .



Este cambio ocurre en la medida que la zona de mineralización secundaria (como calcosina y covelina) generalmente asociada a altas leyes y roca alterada, es reemplazada en forma gradual por mineralización hipógena (calcopirita) , asociada generalmente con menores leyes.

Como ejemplo, se puede observar en la Figura 25 un plan de negocios de largo plazo de una operación de cobre, donde se aprecia el incremento del indicador de dureza SPI asociado con el aumento de la proporción de minerales primarios planificados al proceso de concentración. Como regla general, entonces, la dureza y competencia de la roca aumenta con la profundidad dentro del pit.

Figura 25 : Evolución del Perfil de Dureza y su relación con el tipo de mineralización de sulfuros.



La importancia de este punto radica en que, a través del tiempo, los cambios en competencia y dureza de la roca son un desafío para que los circuitos de molienda mantengan los niveles de procesamiento de diseño. Si no se efectúan modificaciones, el molino SAG llega a ser el cuello de botella de la producción, en esta condición el circuito de molienda se denomina circuito limitado por SAG.

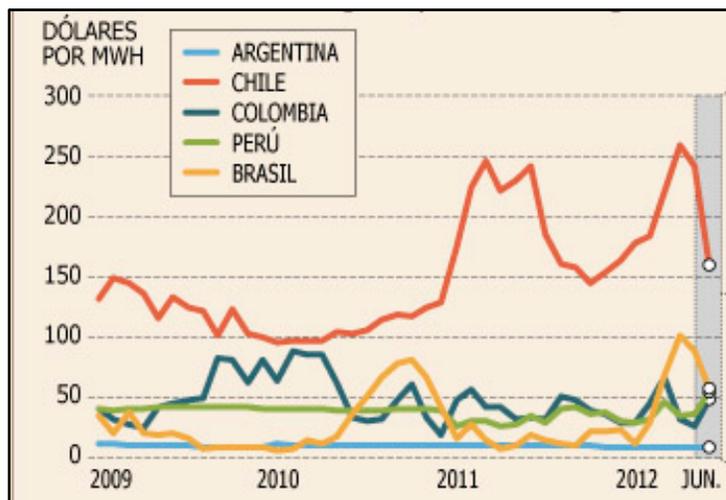
En la condición de limitación por circuito SAG lo que se observa es un incremento de la potencia consumida producto de la mayor dureza del mineral, lo que hace finalmente que disminuya el procesamiento para resguardar una falla en los motores del equipo.

Por esta razón, en la medida que el perfil de dureza indica un incremento sostenido en el tiempo, también se espera que aumente el consumo de energía esperado cuando se tiene un circuito SABC.

Aumento en el Precio de los Insumos

La realidad chilena para la generación de energía indica que más del 75 % de sus necesidades energéticas deben ser compradas a otros países, lo que hace de Chile uno de los países con los costos de energía más caros de Latinoamérica.

Figura 26 : Evolución del Precio de la Energía en Países Sudamericanos.



6.2. Aumento de las Regulaciones - Emisiones de Carbono

La minería es el único sector productivo en Chile que ha declarado una posición respecto del Cambio Climático. En términos generales, esta visión plantea avanzar hacia una economía con menos carbono, pero sobre la base de alternativas eficientes en costo y teniendo en cuenta el grado de desarrollo del país

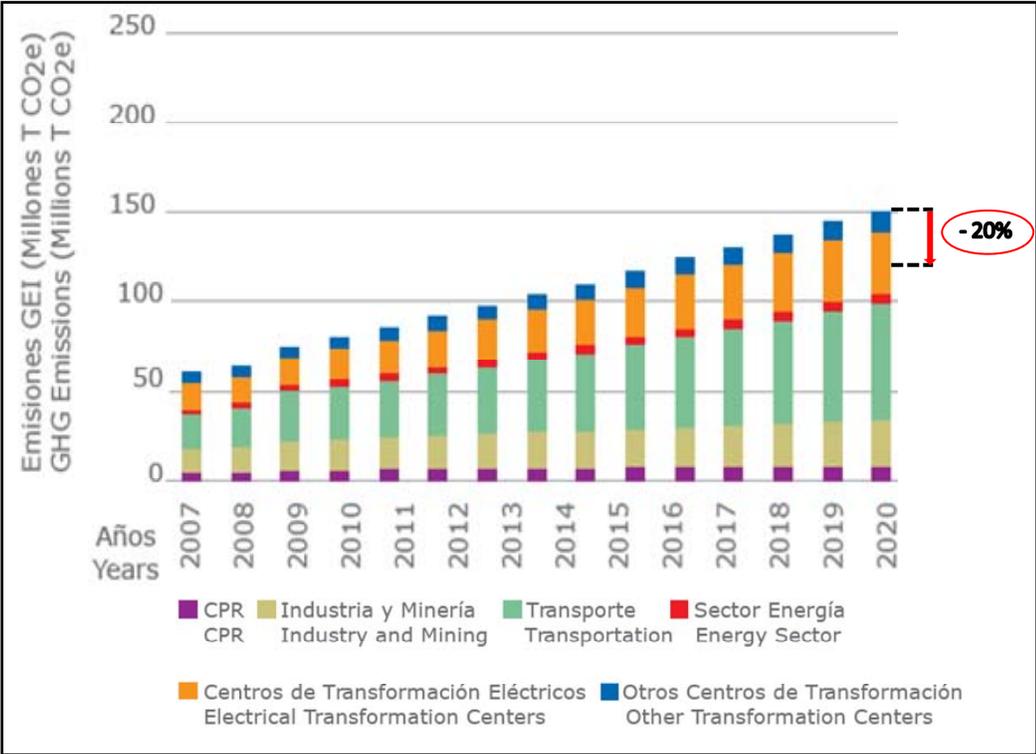
Como consecuencia del cambio que han experimentado los sistemas de generación eléctrica, a raíz de la sustitución en sus matrices de gas natural por otros combustibles fósiles, las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) de la minería de cobre pasaron de 10,31 en el año 2000 a 17,35 millones de toneladas de CO2 equivalente en 2009, según un estudio de Cochilco.

Una de las razones que explica el aumento en la intensidad del uso de energía en la actividad minera es el envejecimiento de las minas actualmente en explotación. Este factor incide en la disminución en la ley de los minerales extraídos, el aumento de las distancias de traslado y la mayor dureza de los minerales. Con el fin de hacer frente al aumento de las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI), las empresas del sector han iniciado procesos para medir su Huella de Carbono y así identificar, a partir de estas evaluaciones, espacios para desarrollar proyectos de eficiencia energética, así como acciones de reducción y/o mitigación.

La huella de carbono es una medida de la cantidad total de emisiones de gases de efecto invernadero referida al dióxido de carbono (CO2), que son causadas directa e indirectamente por una actividad o que se acumulan sobre el ciclo de vida de un producto. La huella de cada producto o actividad se determina según la cantidad de gases de efecto invernadero (GEI) producida, la cual se mide en unidades equivalentes de dióxido de carbono (“CO2-eq”).

El panorama mundial indica que las emisiones de GEI serán penalizadas a través de límites locales a emisiones, por ejemplo en Estados Unidos, donde una vez que los productos comiencen a impactar la competitividad es posible vislumbrar mayores impuestos a las emisiones de productos importados. Esto afecta directamente a los productos intensivos en energía, y dentro de ellos, aquellos con mayor huella de carbono, donde la minería es parte de este sector.

Figura 27 : Proyección de Emisiones de CO2 por sector productivo.



Los impactos en minería de Chile tiene relación con los impuestos por emisiones de CO2 que se implantarán en la industria a mediados de la próxima década, donde un impuesto de US\$ 50/ ton de CO2 representa un costo adicional de 7 centavos de US\$/libra de cobre. El costo total representaría US\$ 1.400 millones/año para la gran

minería. Se estima que la minería del cobre en Chile llegaría a emitir 28 millones de toneladas de CO₂ a mediados de próxima década.

6.3. El Cambio Tecnológico como Alternativa

El sector minero, tanto a nivel técnico como a nivel ejecutivo, está en búsqueda de oportunidades de ahorro en costos y reducir el uso de energía en sus operaciones. La investigación y el debate sobre los beneficios que puede tener un quiebre tecnológico está particularmente instalado en el área del diseño y operación de circuitos de conminución, debido a que éstos son responsables de alrededor de un 50 - 70 % de la energía eléctrica utilizada en minería y de una porción significativa del costo directo operacional en minería.

El mayor incentivo para buscar alternativas a las prácticas existentes de conminución son la realidad de los recientes incrementos en los costos de energía, costos de capital y el potencial de disminución de beneficios, por la caída de las leyes en los yacimientos. Las principales áreas de investigación están en los siguientes puntos:

- Investigar tecnologías nuevas y energéticamente más eficientes.
- Tamaño más grueso de molienda
- Mayor chancado, menor molienda
- Nuevos diseños de circuitos
- Preparación de la Alimentación

Los circuitos de conminución que incorporan equipos como el HPGR han llegado a ser parte de la filosofía para el procesamiento de minerales de alta dureza, debido a su eficiencia energética, a su capacidad de generar microfracturas en la roca y liberación preferencial de las especies útiles, lo que está ligado a altos niveles de procesamiento y alta razón de reducción. El siguiente caso de estudio evalúa la alternativa de una expansión de producción que implica comparar un típico y conocido circuito SAG-Bolas del tipo SABC, con un circuito con Chancado Secundario y HPGR.

6.4. Estudio de Caso - Diseño de Circuito SAG versus Diseño de Circuito HPGR

El desarrollo del tema pretende responder las siguientes preguntas centrales :

- ¿Es posible incorporar una tecnología de conminución alternativa a la existente?
- ¿Cuánto es el beneficio económico que cada alternativa puede generar en términos de aumento de producción y ahorro de energía?
- ¿Cuál es beneficio relacionado a emisiones de CO₂ que se pueden obtener con la implementación de la alternativa elegida?

A través del tiempo, la razón de procesamiento de los circuitos SAG-Bolas inicialmente diseñados con ciertos parámetros puede disminuir significativamente ya sea por limitación SAG o limitación de Molienda Secundaria debido al incremento de la dureza del mineral. Para mantener los niveles de procesamiento de diseño, es necesario redefinir estrategias de operación respecto de las especificaciones originales, tales como incrementar niveles de bolas, aumentar la velocidad del molino, o rediseñar la abertura de las parrillas, entre otras. También es posible realizar inversiones de capital para modificar los circuitos de molienda como por ejemplo, incorporar una etapa de chancado de pebbles y/o una etapa de chancado secundario antes de la alimentación al molino SAG.

Con estas iniciativas de mejoramiento del rendimiento, es posible mitigar el impacto negativo de un descenso de producción, sin embargo no logran resolver la problemática de mantener la competitividad ante un escenario de costos crecientes y alto consumo energético. Es necesario entonces evaluar un concepto distinto de diseño basado en eficiencia energética y alto rendimiento para tratar minerales duros.

La problemática en Minera Escondida muestra que las tendencias de mayor dureza en minerales futuros no solamente provienen de las minas actualmente en explotación, Escondida y Escondida Norte, sino también de los nuevos prospectos en desarrollo. Las indicaciones entregadas por ensayos de dureza en Pampa Escondida (un nuevo prospecto), muestran incrementos desde los actuales valores promedios de SPI de 50 min e Índice de Trabajo de Bond de 12,7 kWh/t hasta promedios de 150

minutos para y 15,5 kWh/t. Por otro lado, las minas en operación proyectan valores medios de 70 min y 14,5 kWh/t.

La opción del circuito HPGR, es una alternativa flexible cuyos parámetros pueden ser ajustados para reaccionar a las variaciones del mineral, manteniendo un alto rendimiento. Se ha identificado una gran oportunidad para provocar ahorros económicos y energéticos por el sólo hecho de mejorar el proceso.

6.5. Alcance del Tema

Esta iniciativa es aplicable a las etapas de chancado y molienda en el proceso de concentración de Minera Escondida Ltda., para minerales futuros con altos índices de dureza. Dentro de las actividades planificadas para lograr los objetivos del proyecto se tienen:

Recolectar información complementaria necesaria para la caracterización adecuada de los escenarios a evaluar.

Plantear al menos 1 opción de circuitos plausibles de reducción de tamaño contra el caso base SAG / Molienda de Bolas, teniendo en cuenta la capacidad de procesamiento y nivel de energía requeridos.

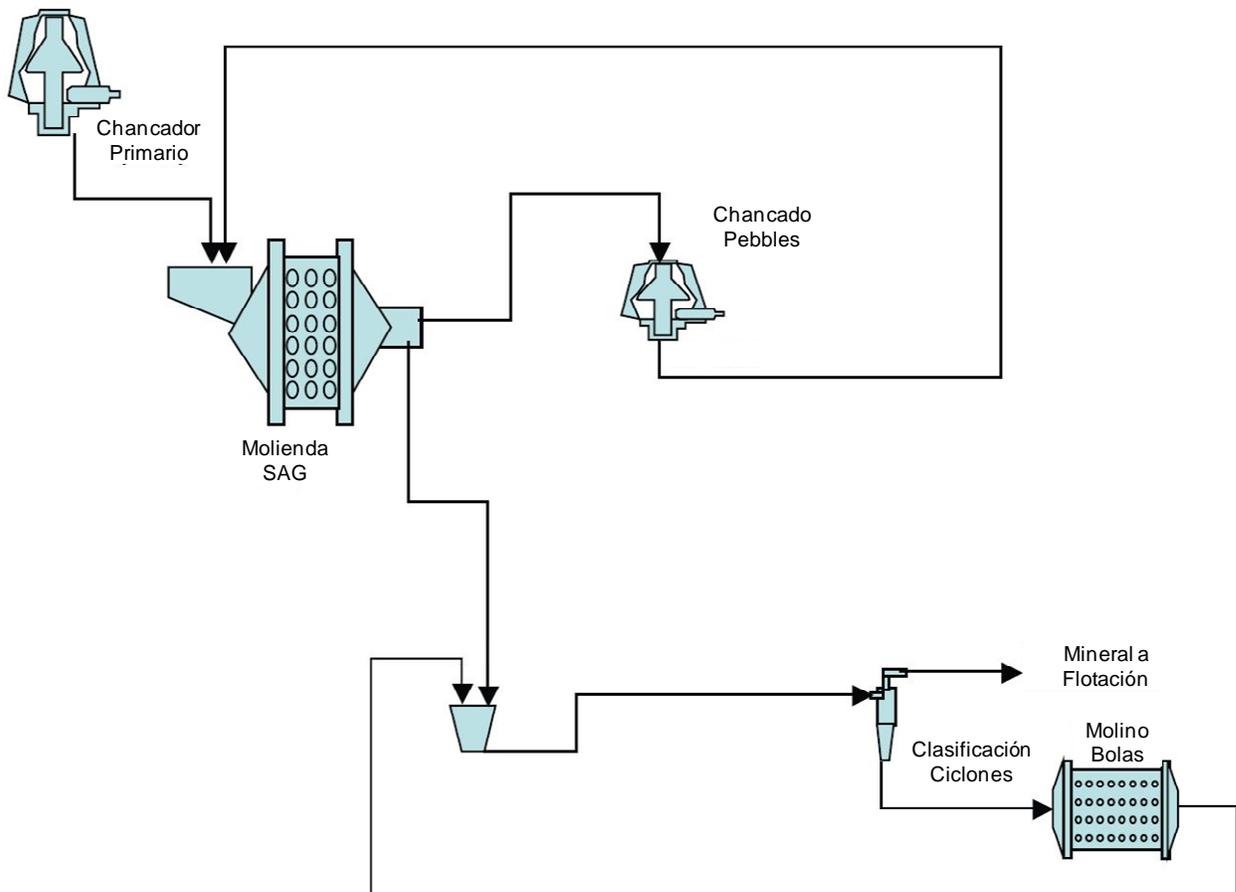
Evaluar económicamente ambas opciones de proceso, respecto de nivel de producción, costos de inversión, costos de operación, y valor actual de los activos.

Recomendar la alternativa de proceso plausible de ser implementada

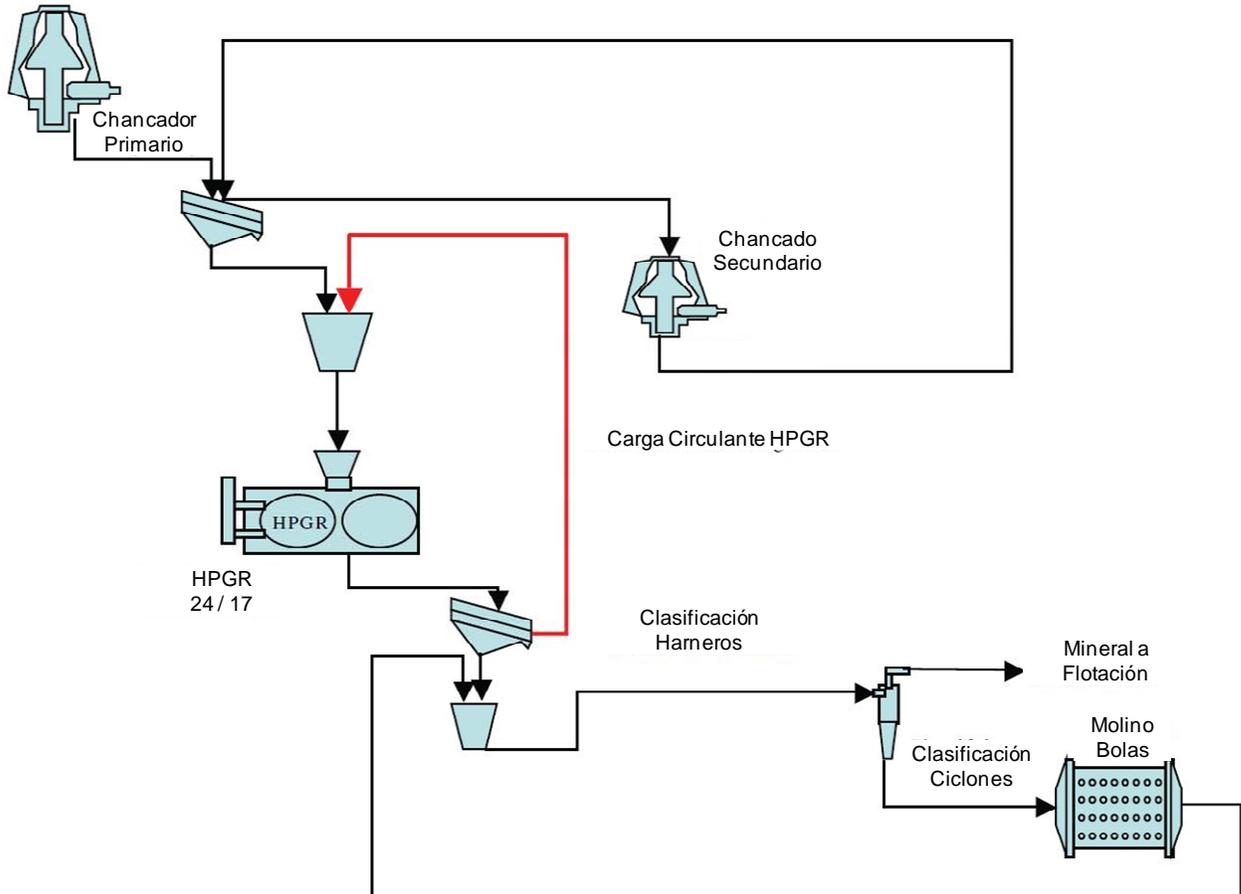
6.6. Opciones a Estudiar

Las opciones de configuración de circuito a estudiar en el presente proyecto estarán soportadas por un plan minero sobre el cual se pueda realizar una evaluación económica que respalde la decisión de profundizar y seguir adelante con los estudios posteriores, o bien, desechar la opción alternativa. Se estudiará un Caso Base, que consiste en la configuración de circuito actual para una planta concentradora con capacidad de tratamiento de 300.000 toneladas por día, y una opción donde cambia el concepto del circuito y elimina la molienda SAG, reemplazándola por una configuración de equipos HPGR y Chancado Secundario. Los diseños de circuitos evaluados se presentan a continuación de manera esquemática:

Caso Base : Configuración SAG / Molienda de Bolas



Opción : Configuración Chancado Secundario / HPGR / Molienda de Bolas



Para un circuito de molienda del tipo HPGR se requieren al menos 2 etapas de chancado, primario y secundario. El chancado primario puede ser el mismo del circuito típico SABC. Los reportes acerca de los circuitos HPGR hacen mención que las etapas de chancado en seco son el "cuello de botella" ya que a menudo las etapas de chancado no son diseñadas de manera adecuada para garantizar un tamaño máximo de alimentación al HPGR (diseño de circuito cerrado). Por ésta razón se debe poner énfasis en diseñar con una capacidad adecuada en chancado y harneros.

6.7. Metodología

Se aplicó la siguiente metodología para desarrollar el caso de estudio:

i. *Recolección de Información:* Con la finalidad de soportar técnicamente la alternativa propuesta, se realizó test físicos de dureza, específicos para el diseño y dimensionamiento de equipos HPGR sobre muestras de sondajes. Esto ya que las pruebas de dureza de rutina utilizados en Minera Escondida, como el SPI y el Bond Work Index (BWI) han sido diseñados para soportar las estimaciones para una configuración SAG y Molienda de Bolas.

ii. *Determinación de las relaciones existentes entre la nueva información para HPGR y los parámetros estándar de dureza de Minera Escondida.* Esto con la finalidad de emplear la mayor cantidad de información desde las bases de datos de dureza existentes para determinar los parámetros necesarios para las estimaciones de tonelaje de HPGR.

iii. *Estimaciones de procesamiento para HPGR,* utilizando el algoritmo de cálculo descrito en el capítulo de 5.8, y en función de las variables de dureza contenida en el modelo de recursos de la compañía se determinó el tonelaje a procesar por esta configuración de circuito en el modelo de bloques.

iv. *Desarrollo del Plan Minero para el Caso Base,* en función de los parámetros estándares de entrada al proceso de planificación se genera un plan de extracción integrado que considera la alternativa de construir una planta concentradora adicional a la capacidad productiva existente de 300.000 toneladas por día de tratamiento.

v. *Definición de Supuestos para la Alternativa de HPGR,* el cual se realizó por revisión bibliográfica de plantas de éstas características ya operando a nivel mundial. Entre los supuestos se consideró el ahorro promedio en consumo de energía, solo para la molienda SAG, respecto de la configuración Chancado Secundario / HPGR y equipos auxiliares.

vi. *Cálculo de la producción, consumos energéticos y reducciones de costo operacional esperados por la incorporación potencial de la alternativa HPGR.*

vii. *Evaluación económica en función de los flujos de efectivo entre ambas alternativas.*

6.8. Criterios para la Evaluación Económica

Para realizar la evaluación económica se utilizó un plan de negocios de largo plazo, que incluye la opción de una planta concentradora de una capacidad de 300.000 toneladas por día. La opción de circuito HPGR se comparó tomando como supuesto que la puesta en marcha e inversión ocurre en el mismo año, respecto del caso base. No se realizó optimización del plan minero utilizando la información del rendimiento de la opción HPGR, debido al tiempo y recursos para realizar este ejercicio.

Plan Minero

El plan minero posee la siguiente información de trabajo, reportada para cada periodo anual:

- Tonelaje Procesado por cada Planta
- Ley de Cobre alimentada
- Índice de Trabajo de Bond (BWI)
- SAG Power Index (min)
- Toneladas de Concentrado Producidas
- Fino de Cobre producido

Datos de Entrada

Se utilizó los siguientes datos para el cálculo de la utilidad, costos de operación principales e impuestos adicionales, en la evaluación económica:

Precio de la Energía (USD/kWh)	0,10
Costo Unitario Bolas SAG 5" (USD/ton)	0,280
Costo Unitario Liners SAG (USD/ton)	0,180
Costo Unitario Liners HPGR (USD/ton)	0,193
Impuesto por Emisiones CO ₂ (USD/MWh)	20
Margen de Utilidad (USD/lb)	2,0
Tasa de Descuento (%)	10

Estimación del Costo de Capital

Desde el Caso Base la estimación del costo de capital indica que se requieren USD 7.000 millones para la construcción de la planta y construcción de la planta de agua desalada que requiere ésta alternativa.

Usando la relación de Costo de Capital entre la opción SABC versus HPGR del revisión bibliográfica sobre trabajo de Los Bronces, Morrison y Cerro Verde, se estimó una diferencia de 19 % adicional para el Costo de Capital de un circuito HPGR, respecto del circuito SAG esto sólo por concepto de equipos e instalaciones asociadas a chancado y molienda.

Se considera además que sólo un 60 %, correspondiente a las instalaciones y equipos de molienda, está afecto a este capital adicional, ya que en ambos casos se requiere instalaciones similares de agua, energía, planta de relaves e infraestructura adicional, luego el costo de capital adicional es un 11 % mayor para la alternativa de HPGR:

	USD (millones)
Costo Capital SABC	7.000
Costo Capital HPGR	7.770

Supuestos

Se estima un ahorro de un 25 % en el consumo de energía requerida por el circuito SAG, no se consideran ahorros de energía en molienda secundaria, ya que la tendencia de la operación es utilizar el máximo de energía en la molienda de bolas.

Se estima que la relación ton CO₂-Equivalentes / MWh es 1, por lo tanto la reducción de impuestos por emisiones está relacionada directamente con el consumo de energía.

Para estimar los costos de operación, el trabajo se enfocó en las diferencias de los ítemes de mayor impacto como son : Consumo de Energía, Consumo de Bolas de Molienda, y Consumo de Liners (Revestimientos).

Se supone que no existe impacto en los consumos de agua entre ambas alternativas, debido a que no existen modificaciones adicionales en los circuitos de molienda secundaria y flotación.

Se trabajó con el concepto de margen de utilidad, en vez de utilizar un precio del cobre. Se presentará una sensibilidad respecto de esta variable, que incluye los costos fijos de manera implícita. Se supone además que los costos fijos son iguales en ambos casos.

Se supone un precio de la energía constante

Cálculo de los Flujos de Caja

Se presenta una descripción de los cálculos de flujo de caja muy simplificados para cada alternativa evaluada, es decir para el Caso Base y la Opción HPGR:

=	PRODUCCION (Libras de Cu Fino)
x	MARGEN DE UTILIDAD (USD / lb)
=	UTILIDAD (USD)
+	AHORRO ACERO (USD)
+	AHORRO ENERGIA (USD)
+	AHORRO CARBON TAXES (USD)
=	FLUJO DE CAJA

Se debe mencionar que en el Caso Base no existen ahorros por concepto de energía, acero y emisiones.

6.9. Resultado de la Evaluación Económica

Valor Actual Neto

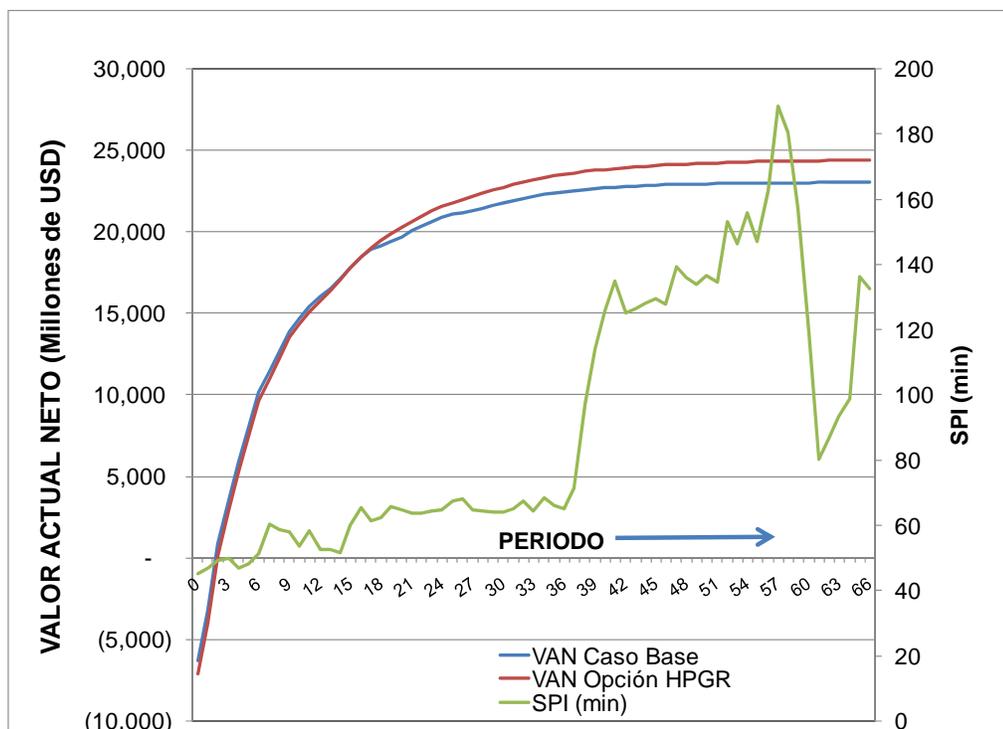
El resultado de la evaluación económica muestra en la Tabla 8, que se genera valor adicional al considerar la opción de instalar un circuito de HPGR. Esto es 1.130 millones de USD.

Tabla 8 : Resultado de Valor Actual Neto adicional entre ambas opciones estudiadas

VAN Caso Base	USD	23,034,160,000
VAN Opción HPGR	USD	24,163,970,000
Δ VAN	USD	1,129,810,000

En la Figura 28 se observa gráficamente como el mayor valor se genera hacia el final del plan minero, cuando los valores de dureza son mayores, y la configuración HPGR es más eficiente.

Figura 28 : Valor Actual Neto de las opciones estudiadas respecto de la proyección de dureza en el plan minero evaluado.



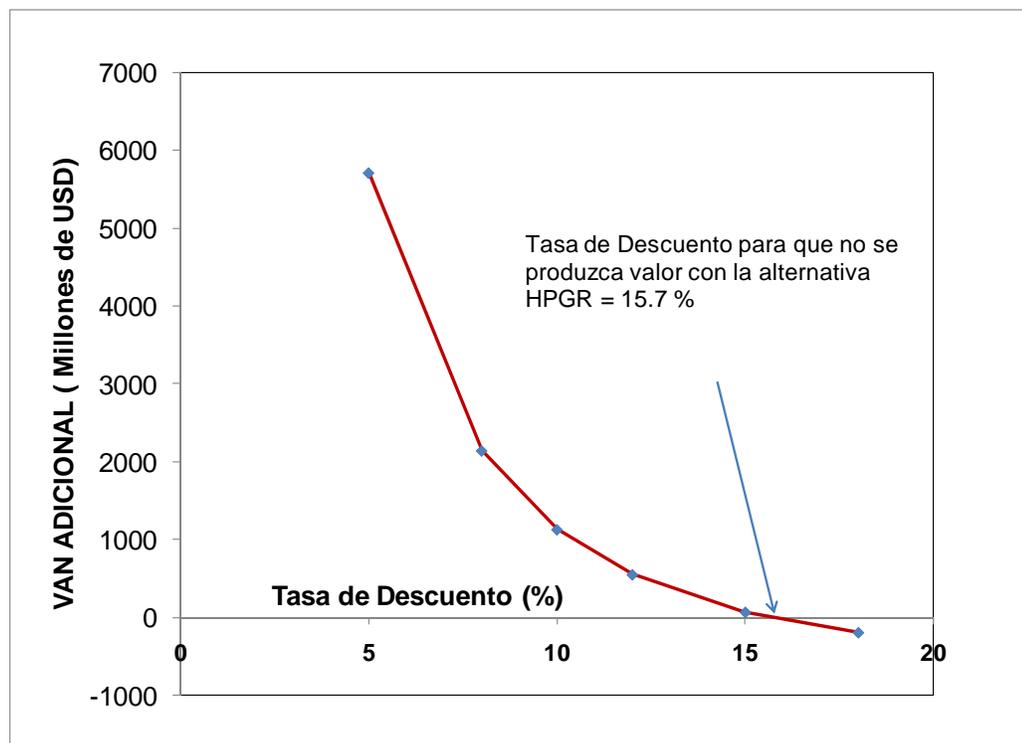
Sensibilidad ante la Tasa de Descuento

Para analizar la potencialidad financiera de la alternativa con HPGR, se realizó un análisis de sensibilidad del VAN adicional que se genera, en función de la Tasa de Descuento utilizada para la evaluación. En la Figura 29 se observa que la Tasa de Descuento a la cual no existe valor adicional es de 15,65 %. Como referencia, la Tasa utilizada para la evaluación base es de 10 % .

Tabla 9 : Variación de la Tasa de Descuento y su efecto sobre el VAN adicional entre ambas opciones estudiadas

	Tasa de Descuento					
	18%	15%	12%	10%	8%	5%
VAN Caso Base (millones USD)	11,761	14,715	18,961	23,034	28,856	44,270
VAN Opción HPGR (millones de USD)	11,570	14,784	19,513	24,164	30,999	49,979
Δ VAN (millones de USD)	(191)	70	552	1,130	2,142	5,709

Figura 29 : Variación del VAN adicional que produce la alternativa HPGR en función de la Tasa de Descuento empleada en la evaluación financiera.



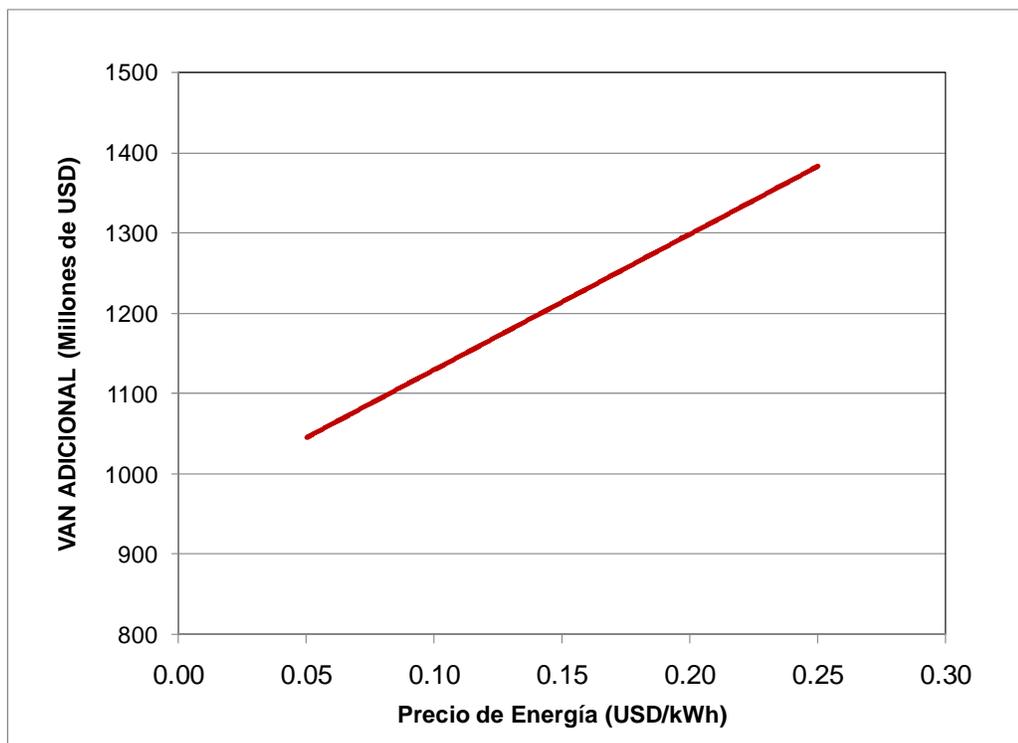
Sensibilidad ante el Precio de la Energía

Uno de los efectos evaluados sobre el valor de cada opción fue el precio de la energía. Como referencia, se debe tener presente que la evaluación base se realizó con un precio de 0,1 USD/kWh. Es posible observar en la Tabla 10 y en la Figura 30, que el valor crece en la medida que el precio de la energía es mayor, haciendo más atractiva la opción más eficiente energéticamente.

Tabla 10 : Efecto del Precio de la Energía sobre el VAN adicional entre ambas opciones estudiadas

	Precio de la Energía (USD/kWh)				
	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25
VAN Caso Base (millones USD)	23,034	23,034	23,034	23,034	23,034
VAN Opción HPGR (millones de USD)	24,079	24,164	24,249	24,333	24,418
	-	-	-	-	-
Δ VAN (millones de USD)	1,045	1,130	1,214	1,299	1,384

Figura 30 : Relación entre el Precio de la Energía y el VAN adicional entre ambas opciones estudiadas



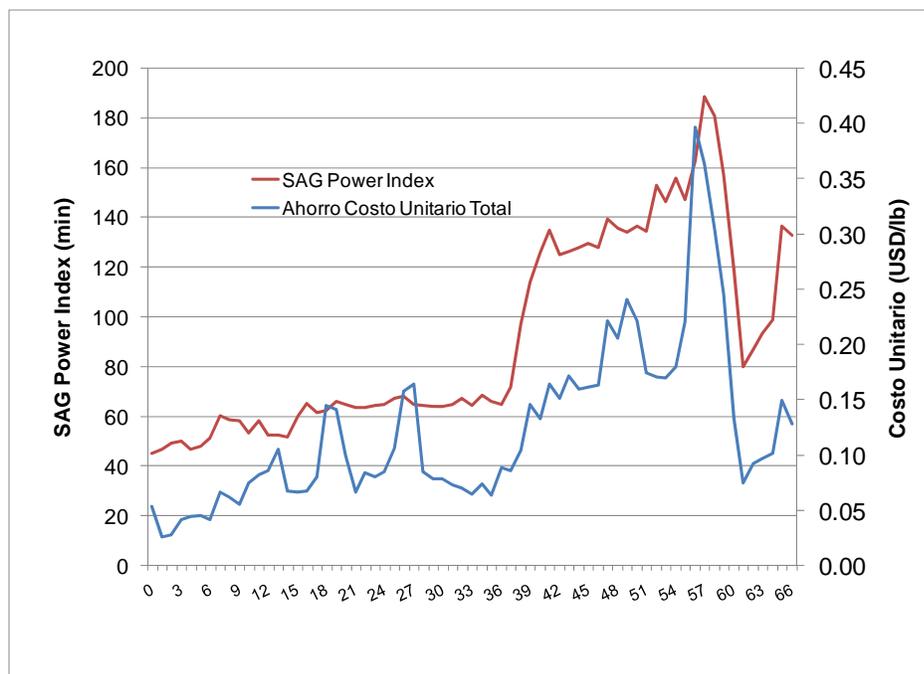
Efectos sobre el Gasto y el Costo de Operación

En la Tabla 11 se muestran la magnitud y la variación del menor gasto operacional, en base anual, por concepto de menor consumo de energía, menor consumo de acero y menor impuesto por emisiones que se observan entre la Opción HPGR y el Caso Base. Como una medida referencial, en la Figura 31 se han graficado las diferencias en costo de operación en USD/lb de cobre producida, por concepto de los ítemes mencionados, versus la tendencia de dureza expresada como SPI. De tal modo que se observe que las mayores disminuciones de costo operacional se logran en un ambiente de minerales duros.

Tabla 11 : Efecto del Cambio Tecnológico sobre el Gasto Operacional

Diferencia Gasto Operacional	Millones USD / año		
	MIN	MED	MAX
Δ Carbon Taxes	1,020,000	3,860,000	6,560,000
Δ Energía (25 % Ahorro)	12,700,000	47,870,000	81,400,000
Δ Acero	(8,900,000)	22,860,000	36,090,000

Figura 31 : Efecto de la Opción HPGR en el Costo Unitario y su relación con la dureza en el plan minero



7. CONCLUSIONES

Este trabajo es el punto de partida para iniciar una discusión profunda acerca de las ventajas que un cambio tecnológico puede provocar en los planes futuros de Minera Escondida Ltda, tanto en términos de la mayor producción obtenida como por los beneficios en costos de operación y el grado de alineamiento que muestra respecto de las políticas medioambientales en el mediano plazo.

La opción de cambio tecnológico tiene un alto potencial de generar valor por sobre el que entregan los circuitos de molienda actualmente en operación. El HPGR tiene el potencial de ser un dispositivo efectivo para incrementar la producción, o bien para mantener los niveles de producción cuando las características de la roca son más competentes.

La opción de circuito HPGR tiene el potencial de reducir el costo operacional en más de un 7 % impactando de manera importante los consumos de energía y acero, dos de los ítemes de costo más significativos en una planta concentradora.

La reducción de emisiones de CO₂ , al operar con un circuito del tipo estudiado en este caso pueden llegar a disminuir en un 25 % mejorando significativamente la huella de carbono de la compañía, reduciendo el impacto ambiental. Este punto está tomando importancia relevante en la toma de decisiones de los planes de crecimiento en la industria minera en general.

Se debe tener en cuenta la mayor complejidad operacional que presenta la alternativa tecnológica estudiada, debido a la administración intensiva de equipos secundarios adicionales, como correas transportadoras, harneros y altas cargas circulantes en el proceso.

Es recomendable realizar un análisis con mayor profundidad desarrollando un plan minero optimizado con la variable asociada al rendimiento de procesamiento HPGR, el que supone un impacto en el costo de oportunidad y en el volumen de reservas.

GLOSARIO

AG	Autógeno
BWi	Índice de Trabajo de Bond
cc	Calcosina
CO ₂	Dióxido de Carbono
cpy	Calcopirita
Cu	Cobre
cUSD	Centavos de Dólar
cv	Covelina
DWi	Drop Weight Index
Fe	Hierro
GWh	Giga Watt por Hora
h	Hora
HE	Alto Enriquecido - Sulfuros Secundarios
kg	Kilogramos
kN	Kilo Newton
kt	Kilo toneladas
kW	Kilo Watt
kWh	Kilo Watt por Hora
LE	Bajo Enriquecido - Sulfuros Primarios
m	Metro
m ³	Metros Cúbicos
min	Minutos
mm	Milímetros
m/s	Metros por segundo
Ma	Millones de Años
MPa	Mega Pascales
MTM	Millones de Toneladas Métricas
py	Pirita
ROM	Run Of Mine - Mineral sin Chancado
s	Segundo
SAG	Semi-Autógeno
SABC	Circuito tipo semiautógeno-Bolas-cerrado
SX-EW	Extracción por Solventes y Electro Obtención
t	Toneladas
T CO ₂ e	Toneladas de Carbono Equivalentes
tpd	Toneladas por Día
tnf	Toneladas Métricas de Fino
TM	Toneladas Métricas
TWh	Tera Watt por Hora
t/h	Toneladas por Hora
um	Micrometro
USD	Dólar
US\$/lb	Dólares por cada libra
Wi	Indice de Trabajo

BIBLIOGRAFÍA

Alexander, Jake. Application of High Pressure Grinding Rolls in the Mining Industry. WARDROP. 2008.

Caceres, Jorge. Apuntes de Metalurgia Extractiva. Programa de Mineralogía y Metalurgia. Universidad de Aconcagua.

Camacho, Rodolfo. . Medioambiente y Cambio Climático. Gestión Ambiental en la Industria Minera y sus Desafíos. Presentación MBA Minería Universidad de Chile 2011 Junio 2011.

Connelly, Damien. The Evolution of Crushing and Grinding: Changes in the Industry. MINING.com. July-August 2010

Consejo Minero. Informe Financiero de la Gran Minería de Chile, 2010

Consejo Minero. Informe Social, Ambiental y Económico del Consejo Minero de Chile A.G., 2010.

http://www.consejominero.cl/home/doc/CONSEJO_INFORME2010.pdf

Daniel, M., Lane, M. y McLean, E. Efficiency, Economics, Energy and Emissions- Emerging Criteria for Comminution Circuit Decision Making. XXV International Mineral Processing Congress (MPC). Brisbane, Australia. 6-10 September, 2010.

Daniel, M y Lewis-Gray, E. Comminution efficiency attracts attention. Bulletin. Minerals Processing. Octubre 2011.

Delgado, Carlos. Apuntes Diplomado "Valorización y Certificación de Activos Mineros", 2011.

Feller-Rate. Clasificadora de Riesgo. Informe de Clasificación. Minera Escondida Limitada. Abril 2011.

<http://www.feller-rate.cl/general2/corporaciones/escondida1104.pdf>

Hernández, Diego. Tendencias Recientes y Perspectivas de la Industria Minera Global y de Chile. Presentación MBA Minería Universidad de Chile 2011. Marzo 2011.

Inohue, Toshio. Mineral Comminution and Separation Systems. .Civil Engineering Vol II.

Ipinza, Jorge. El consumo específico de Energía en Plantas Concentradoras. Minería Chilena. Revista N° 342. Diciembre de 2009.

http://www.mch.cl/revistas/index_neo.php?id=1060

Jankovic, A., Dundar, H. y Mehta, R. Relationships between comminution energy and product size for a magnetite ore. The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy. Vol 110 Non-Refereed Paper. March 2010.

John, David et al. Porphyry Copper Deposit Model. Scientific Investigations Report 2010–5070–B. U.S. Department of the Interior. U.S. Geological Survey. 2010

Johnson, N. Review of Existing Eco-efficient Comminution Devices. Abstract.

Kawatra, Komar. Advances in Comminution. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc. Littleton, Colorado, EEUU. 2006.
ISBN-10: 0-87335-246-7

Lewis-Gray, Elizabeth. Coalition for Eco-Efficient Comminution. CEEC Presentation to SAIMM, February 2012

McKen, Andre y Williams, Steve. An Overview of the Small-scale Tests Available to Characterize Ore Grindability for Design Purposes. SGS Technical Bulletin, 2005

Minera Escondida Ltda. Manual de Operaciones Concentradora Laguna Seca. Teoría de Molienda. Septiembre de 2004.

Mine Sites. Escondida Mine.
<http://www.infomine.com/minesite/minesite.asp?site=escondida>

Morley, C y Daniel, M. HPGR Flowsheets - The Next Generation. Procemin 2009, Santiago Chile. 2009.

Morley, C. HPGR—FAQ. The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy. Vol 10, Refereed Paper, March 2010.

Morrell, Steve. Mapping Orebody Hardness Variability for AG/SAG/Crushing and HPGR Circuits. Steve Morrell, 2010.

Morrell, Steve. The Influence of Feed Size on Autogenous and Semiautogenous Grinding and The Role of Blasting in its Manipulation.

Mosher J. B. and Tague C.B. Precision and Repeatability of Bond Grindability Testing. Mineral Engineering, Volume 14, No. 10.

Ntsele, Charles y Sauermann, Gerhard. The HPGR Technology - The Heart and Future of the Diamond Liberation Process. The Southafrican Institute of Mining and Metallurgy. Diamonds Source to Use. 2007.

Pellegrini, P. Comminution Circuit Design and Simulation for the Development of a Novel High Pressure Grinding Roll Circuit. The Faculty of Graduate Studies. Tesis. Mining Engineering. The University of British Columbia. Vancouver, Canada. November 2010.

Richard.R.V. Apuntes de Chancado y Trituración. 2009.
<http://richard-mecanicoind316.blogspot.com/2009/06/chancado-o-trituracion.html>

Rosario, P y Hall, R. A structured approach to the evaluation of the energy requirements of HPGR and SAG mill circuits in hard ore applications. The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy. Vol 10, Refereed Paper, March 2010.

Sepulveda, Jaime. A simulation analysis of the net effect of feed particle size distribution on SAG mill performance. Moly Cop Grinding Systems, Santiago, Chile.

Tapia, Jaime. Fundamentos de la Conminución. Apuntes Preparación Mecánica de Minerales, Universidad Arturo Prat.

The Economist. An unexpected setback. Energy in Chile. Julio 2012.

Torres, Magín. Modelación y Simulación de Molienda con Rodillos a Alta Presión. Tesis para Optar al Grado de Magister en Ciencias de la Ingeniería. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Departamento de Ingeniería de Minas. Universidad de Chile. Santiago, 2010.

Universidad de Antioquía. Apuntes de Conminución, Facultad de Ingeniería.

Vanderbeek, J.L., HPGR Implementation at Cerro Verde. SAG 2006. Department of Mining Engineering. University of Columbia. Vancouver, B. C., Canada. 2006.

Vial, Joaquín. Tendencias Globales y Cobre, BBVA Research. Presentación MBA Minería Universidad de Chile 2011. Marzo 2011.

Von Michaelis, H. How energy efficient is HPGR?. World Gold Conference 2009, The Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 2009.