ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 2002
Seria: GÓRNICTWO z. 254 Nr kol. 1563

Alberto CORTÉS ALVAREZ, Belisario GALLARDO ALCAYAGA
Uniwersytet de La Serena, Chile
Aneta KRÓL
Politechnika Śląska, Gliwice

DESARROLLO DE LA INDUSTRIA CUPRÍFERA EN CHILE

Resumen. El presente trabajo plantea que una forma de permanecer vigente en los mercados es por medio de la investigación de nuevas tecnologías que permitan acentuar fuertes ventajas económicas frente a sustitutos, y a recesiones coyunturales. Se analizan las propiedades del cobre, los productos sustitutos y los esfuerzos de la industria minera para mantener su liderazgo [2].

EXPANSION OF COPPER INDUSTRY IN CHILE

Summary. The present work raises that a form to remain effective in the markets is by means of the investigation of new technologies that allow to accentuate forts economic advantages forehead to substitutes, and conyunctural recessions. The properties of copper, and the efforts of the mining industry are analyzed to maintain their leadership.

1. Introducción

La historia moderna del cobre comienza con el descubrimiento de la electricidad y la multitud de inventos basados en ella. Cuando a principios del siglo antepasado, Francis Ronald transmite con éxito los primeros mensajes telegráficos con alambres de cobre subterráneo, este se vuelve imprescindible para el desarrollo industrial [4].

Actualmente se define la intensidad del uso de los metales como el cuociente entre el consumo per-cápita (kg/habitante) y el índice de actividad industrial que depende fuertemente del nivel de crecimiento económico de los países y del grado de sustitución del metal, tenemos que: para el caso del cobre en países con economías en desarrollo y emergentes la intensidad de uso es creciente, mientras que en economías industrializadas la intensidad de

uso del cobre es decreciente, dado que los sectores más dinámicos se orientan a áreas menos intensivas en este metal, como son las de servicios y alta tecnologías.

2. Desarrollo tecnológico en la industria cuprífera

2.1. Aspectos generales

Los progresos tecnológicos en la minería habían aparecido cada vez que se planteaba un problema de abastecimiento frente a las necesidades de la demanda que desde principio del siglo pasado crecía a un ritmo exponencial. Recientemente, con la agudización de los riesgos ambientales y la sensibilización de la opinión pública a los problemas que de ellos derivan, han exigido el desarrollo de tecnologías limpias para mitigar dichas exigencias de la legislación medio ambiental [2].

2.2. Etapa de exploracion

Las técnicas de exploración minera han mejorado considerablemente en la última década, siendo posible predecir la existencia de yacimientos subterráneos antes de comenzar a perforar. Actualmente se utiliza como herramienta base la fotografía satelital junto con las cartas geológicas. Hace 10 años la fotografía satelital era utilizada sólo por las empresas extranjeras en Chile. Dichas tecnologías, no eran aún utilizadas por las firmas locales existiendo un retraso tecnológico de aproximadamente 10 años en esta materia. Otros avances tecnológicos en esta área han sido: instrumentos portátiles y de bolsillo (GeoExplorer, GPS PathFinder, Aspen-GPS, etc.) que proporcionan la posición geográfica en forma muy exacta lo cual facilita enormemente la tarea de recolección de muestras superficiales, técnicas sismográficas para la búsqueda de recursos hídricos, y lo que ha sido mas relevante es la incorporación de diferentes paquetes computacionales (Factory Suite, AcQuire, Gpick32, Micromine 3D, Achieve, Vulcan, Minescape, Pcmine, Pcexplor, Geomodel, Minesurvey, Gemsolid, Gemplot, etc.) que a partir de la información de sondajes permiten modelar el yacimiento y planificar su explotación óptima junto al manejo de la información topográfica histórica y diaria en tres dimensiones. El rezago tecnológico con que Chile opera en este campo se ha reducido considerablemente en años recientes. Por ejemplo, la nueva línea 1998 de softwares para control de producción y exploración de la empresa norteamericana Wonderware fue lanzada al mercado en forma casi simultánea en Chile y en

Estados Unidos. La certeza de información en las distintas etapas de la exploración que es posible alcanzar con estas nuevas tecnologías, permite llegar a un conocimiento del depósito, con un mínimo de riesgo a la etapa de planificación de la explotación.

2.3. Etapa de explotación

Dado el avance tecnológico en el ámbito mundial en los equipos mineros, los principales esfuerzos que se han realizado en Chile consisten en adquirir equipos preseleccionados en carácter de prueba para su posterior utilización generalizada [1].

Por otra parte, dada la creciente complejidad de los equipos mineros (Ej.: Equipos con uno o dos computadoras a bordo correspondientes a la tecnología Vital Information Monitoring System), la tendencia, ha sido que la mantención sea realizada por el proveedor del equipo. Por lo tanto, lo que realmente se adquiere son horas efectivas de disponibilidad de cada equipo. Esto, ha trasladado esfuerzos técnicos y de gestión que antes se requerían al interior de cada empresa a los proveedores de equipos mineros.

Tanto en cantidad como en valor, los camiones figuran en primer lugar del parque de equipos en el área mina. El desafío técnico y de ingeniería consistio en construir camiones con una capacidad de carga de 350 toneladas métricas, como promedio. Caterpillar, Unit Rig, Liebeherr y Komatsu son las firmas que se encuentran en la etapa de diseño, fabricación y testeo de nuevos modelos super gigantes.

En el caso especifico de Codelco Chile, además de asegurar su posición competitiva de sus minas a rajo abierto, sus principales esfuerzos se han orientado al desarrollo de tecnologías de explotación de minas subterráneas, especialmente El Teniente: Es así como se han realizado exitosos esfuerzos tendientes a robotizar las faenas extractivas, en forma particular la del área Teniente Sub-6, la cual por diversos problemas geomecánicos que ha presentado es considerada de alto riesgo para los operadores. Lo anterior, ha implicado desarrollar prototipos de equipos que han requerido utilizar tecnologías de punta, no siempre disponible en el mercado [5].

Las principales modernizaciones que se han introducido al interior de las empresas mineras (aparte de la modernización de los equipos rodantes) ha sido el desarrollo de: técnicas computacionales de planificación y explotación minera; sistemas de chancado primario en mina (móviles y semimóviles); sistemas de traslado de mineral por correas transportadoras a las instalaciones fijas de chancado y molienda; sistemas de control computarizado en el

despacho de camiones y la optimización del costo explosivo – molienda (manejo de granulometría en la mina).

2.4. Etapas del proceso de obtención del cobre

En una etapa siguiente, es necesario convertir la mena en trozos de tamaño reducido o pulverizarla, lo que se logra mediante el chancado de la roca que se extrajo de la mina.

Existen dos principales procesos metalúrgicos para llegar desde la extracción del mineral de los depósitos hasta la obtención del metal puro: el proceso de concentración y pirometalurgico que se utiliza en los minerales sulfurados y el proceso hidrometalúrgico que se utiliza en minerales oxidados y en sulfuros secundarios. Cada uno de ellos consiste en una serie de etapas separadas.

2.4.1. Proceso de concentración

Los avances tecnológicos más importantes de este proceso son el reemplazo de la técnica de molienda tradicional a la molienda SAG (molienda autógena) lo que permitió menores exigencias de tamaño de alimentación, simplificando las plantas de chancado y el logro de mayores tonelajes por unidad de energía (kW/t).

Las celdas de flotación además de cambios en su diseño adquieren gigantismo, disminuyendo el número de unidades para un mismo tonelaje con la consiguiente disminución de costos operacionales.

El avance en materia de equipos trajo consigo la automatización y el control por sistemas de expertos (Super SAG y Super Ball).

Con lo anterior se ha logrado incrementar el nivel de procesamiento de mineral, junto con mejorar la eficiencia metalúrgica, producto de una granulometría de alimentación a flotación más estable permitiendo contrarrestar la natural disminución de ley del mineral y de su dureza en el tiempo [1].

Importantes empresas mineras culminan sus operaciones en Chile con la obtención de concentrados de cobre, los que son exportados a distintos lugares del mundo. Estas empresas aprovechando situaciones gravitacionales han perfeccionado el transporte hidráulico de sus concentrados, desde planta a puerto, cubriendo grandes distancias con un significativo ahorro en el costo de transporte, disminución de riesgos e impactos ambientales, etc.

2.4.2. Proceso pirometalúrgico

El primer avance tecnológico en la pirometalurgia del cobre se produjo inyectando oxigeno en los hornos reverberos, mejora que permitió bajar el consumo de combustible durante la fase de fusión [5].

Posteriormente en la fundición de Caletones de la División Teniente (Codelco Chile), se inicio la fusión de concentrados en convertidores "Pierce Smith", pero esta tecnología fue discontinuada, iniciandose estudios tendientes a perfeccionar y lograr la fusión de concentrados en forma continua de manera diferente a la establecida en esa fecha.

Esos estudios y posteriores experiencias a escala piloto, se tradujeron en la creación de una tecnología propia denominada "fusión – conversión simultanea en convertidor tipo Teniente". Aunque por medio de esta técnica era posible la obtención de cobre blister en una sola etapa, se vio la conveniencia operacional de llegar en la conversión hasta un eje de alta ley o metal blanco, con un contenido de cobre de 74 a 76%.

Tanto el metal blanco como la escoria, son extraídos a intervalos regulares de tiempo y sin interrumpir las operaciones de soplado y de alimentación de concentrado y fúndente. Posteriormente el metal blanco producido, es procesado en convertidores convencionales (Pierce Smith) para producir cobre blister.

El proceso de fusión – conversión continua, presenta importantes ventajas con respecto al proceso convencional (bath), aunque el producto final no sea cobre blister:

- Alta recuperación de concentrados. Se ha determinado que no más de un 2% del concentrado alimentado es arrastrado por los gases.
- Mejor aprovechamiento de la energía calórica generada por las reacciones del proceso como consecuencia de la continuidad de la operación.
- Factibilidad de recuperar en forma continua el gas producido, de alto contenido de SO_2 (10 – 12%), para producir ácido sulfúrico.

2.4.3. Refinación electrolítica

El cobre obtenido de los convertidores es moldeado, en algunos casos para su venta directa como blister de alta pureza, y en otros casos como un ánodo para ser refinado electrolíticamente. Este último caso cuando la presencia de metales nobles o impurezas lo justifican.

Este proceso metalúrgico de obtención de cobre químicamente puro, basado en el aprovechamiento de la corriente eléctrica y cuyo producto final son cátodos de

electrorefinación, no ha sufrido grandes cambios tecnológicos en sí, fuera de la automatización y control informático.

2.5. Procesos hidrometalúrgicos

El objetivo de los procesos hidrometalúrgicos en general está orientado a extraer, purificar, concentrar o recuperar especies inorgánicas de valor económico tal como sales y metales, mediante soluciones acuosas.

La recuperación del cobre desde las soluciones ricas se efectuó durante un largo período por medio de la precipitación selectiva de los iones metálicos.

2.5.1. Tecnología SX-EW

Tecnologia extracción por solvente (SX)

La extracción de metales desde soluciones acuosas mediante solventes es un proceso de intercambio contínuo. Inicialmente el metal es extraído desde la fase acuosa impura hacia la fase orgánica. El orgánico cargado con el metal es separado físicamente de la fase acuosa y transferido a un reactor separado para el stripping. En la fase de stripping, el metal se transfiere a una nueva fase acuosa para producir una solución purificada y más concentrada que la inicial. Las fases son separadas nuevamente y el orgánico descargado (orgánico barren) es retornado para ser contactado con la solución acuosa impura de alimentación, y así continúa la extracción.

Tecnología de electroobtención (EW)

Se base en el aprovechamiento de la corriente eléctrica y las características de la "Electrolisis húmeda". El cobre contenido en una solución acuosa al estado iónico, es obtenido por medio del empleo de un ánodo insoluble y el metal se deposita catódicamente, en un cátodo permanente (acero inoxidable) o en una lámina inicial de cobre de 99,99% (tecnología convencional). Producto final son Planchas de cátodos de cobre de alta pureza [4].

Las ventajas comparativas de la tecnología SX-EW normalmente se aplican a sulfuros de cobre de leyes inferiores a 0,8% y a óxidos de cobre con leyes inferiores a 0,75%. Adicionalmente, otras limitaciones que esta tecnología encontró en Chile fueron el alto consumo de ácido sulfúrico, la poca disponibilidad y elevado precio del ácido sulfúrico, las bajas recuperaciones (65%), el alto consumo específico de energía y problemas de purificación de las soluciones producto de minerales complejos. Cabe destacar que

paralelamente al desarrollo de la hidrometalúrgica existió un avance importante en los procesos pirometalúrgicos, los que permitieron aprovechar al máximo la energía calórico contenida en los sulfuros, proporcionando un menor consumo de energía que la electro-obtención. Sin embargo, las variables ambientales y los costos de capital para faenas de explotación en los rangos de leyes indicados anteriormente hacen más competitiva la tecnología SX-EW. No hay que olvidar que, a la fecha, la única opción para el tratamiento de minerales de calcopirita (sulfuros primarios de cobre) sigue siendo la pirometalurgia. Por otra parte, la tecnología SX-EW es la única posible y/o la más rentable en materiales secundarios (ripios de botadero, polvos de fundición, sulfuros secundarios de baja ley, etc). Las principales desventajas de la tecnología SX-EW pueden ser resumidas en dos: sólo permite la recuperación de cobre y no de los subproductos (molibdeno, oro, plata, etc.), y es lenta respecto a la pirometalúrgica ya que opera a más bajas leyes (incrementos de concentración de cobre son más graduales). En todo el mundo la industria del cobre sigue estudiando las mejores alternativas para el tratamiento de los minerales. Una de estas investigaciones está radicada en Australia, cuenta con el financiamiento de más de diez compañías mineras internacionales, y se trata de una lixiviación química de concentrados de cobre que no requeriría de las etapas de extracción por solvente y electro-depositación. El llamado "Proceso Intec" arrojaría como producto final cobre de alta pureza en forma de polvo briqueteado.

2.5.2. Proceso "CUPROCHLOR"

Después de cinco años de investigación y pruebas a nivel industrial, Minera Michilla en Chile, cuenta con un proceso que desplazará la lixiviación bacteriana aplicada a minerales sulfurados secundario de cobre.

Este proceso, permitirá recuperar el 93% del cobre sulfurado, proveniente de la mina subterránea Estefanía, proyecto de 50.000 ton/mes que se iniciará a partir del 2002.

El proceso permitirá recuperaciones sobre 90% en un período de entre 100 y 110 días en circunstancias que la lixiviación bacteriana requiere períodos cercanos al año y aun más para recuperaciones en el rango de 70 – 80%.

Los tiempos de lixiviación disminuyen y la recuperación aumenta, lo que significa menores inventarios de cobre en proceso y menor consumo de agua y más cobre.

Las inversiones para una planta que ocupe este proceso en comparación a una de lixiviación bacteriana, son absolutamente comparables ya que tienen las mismas etapas de Proceso que la lixiviación en pilas: chancado, aglomeración, lixiviación, SX y EW. La

diferencia principal radica en que necesariamente lleva una etapa de lavado del Orgánico cargado, para evitar el traspaso físico del Cl a la planta de Electrodepositación, y como trabaja con alto contenido de cloro se requieren materiales no corrosivos situación que también ocurre en algunas plantas de lixiviación de óxidos de cobre [3].

Con respecto a los costos, teniendo en consideración la significativa diferencia en las recuperaciones del orden de un 10% mayor que las mejores recuperaciones bacterianas, los costos son definitivamente menores.

Este reactivo, que es Cloruro de Calcio, forma yeso al reaccionar instantáneamente con el ácido sulfúrico y al mismo tiempo incorpora iones cloruros a la solución de lixiviación, creando la alta capacidad de oxidación del ión cúprico.

La incidencia del reactivo Cloruro de Calcio en el costo de producción, como es posible fabricarlo en Chile por valores del orden de US$ 100/ton, su incidencia en el costo de producción no será relevante.

3. Situación medio ambiental

Proyecto de captación y tratamiento de gases de convertidores Pierce-Smith en Chuquicamata. Ha elevado la captura de arsénico a más de un 90% y la de SO_2 a más de un 80%. Los estudios de ingeniería conceptual del Plan de Desarsenificación de la división Chuquicamata, señalaron que era posible obtener un control ambiental del 97% del total de arsénico y azufre generados, situándolos en estándares internacionales.

División Salvador concluyó su proyecto Manejo y Limpieza de Gases, lo cual ha disminuido drásticamente la emisión de gases fugitivos, posibilitando la instalación de la planta de ácido sulfúrico iniciada en 1997 y puesta en marcha en el año 1999.

Por su parte, División El Teniente construyó su primera Planta de Ácido Sulfúrico, que fue puesta en marcha en 1998.

En cuanto a la minería privada, empresas como Collahuasi, Mantos Blancos, Quebrada Blanca, Candelaria, Escondida, y El Abra, han estado haciendo cuantiosas inversiones ambientales durante los años recientes, y mantienen una constante preocupación por la sustentabilidad ambiental de sus operaciones y faenas.

Quebrada Blanca, ejemplifica el uso de tecnologías ambientales de punta, obteniendo el cobre metálico mediante lixiviación bacteriana, extracción por solvente y electro-obtención, procesos que no producen humo de fundición, ni relaves, ni eliminan soluciones líquidas.

Además tiene bajo consumo y muy eficiente utilización del agua, y usa el transporte de un producto en estado metálico [1].

Minera Escondida ha validado sus estudios de impacto ambiental, aprobados por las autoridades pertinentes, entre los cuales se destaca el de descarga submarina de los excedentes líquidos del transporte de concentrado, ante expertos del programa de las Naciones Unidad para el Medio Ambiente (P.N.U.M.A.) y la Comisión Permanente del Pacífico Sur (C.P.P.S.), en un taller de trabajo realizado en Antofagasta.

Entre los proyectos que utilizan tecnologías limpias (aplicable sólo a minerales tipo óxidos de cobre y sulfuros secundarios), que mitigan los efectos dañinos al ambiente, o hidrometalúrgicos (lixiviación, extracción por solvente y electro-obtención), actualmente en operación destacan: Cerro Colorado, Quebrada Blanca, proyecto Lince-Michilla, proyecto Zaldívar, Radomiro tomic y proyecto Andacollo-Cobre.

Finalmente, es importante destacar los esfuerzos a nivel de ingeniería nacional en el área ambiental, ya que si bien las principales mejoras en el área ambiental se encuentran asociadas a reemplazos de equipos y a nuevas instalaciones (Ej.: horno eléctrico en lugar de reverbero, plantas de ácido, plantas de secado de concentrado, plantas de oxígeno, precipitadores electrostáticos, etc.), tecnologías ya conocidas a nivel mundial, siempre es posible optimizar las instalaciones existentes sin grandes inversiones.

A continuación se mencionan dos casos en los cuales ha existido un aporte en el área medio-ambiental a nivel de ingeniería local [4].

Las emisiones de neblina ácida al interior de los edificios de electro-obtención de cobre es un problema común a numerosas empresas mineras a nivel mundial. La solución tradicional ha sido la dilución de la contaminación y la incorporación de esferas de PVC sobre la superficie del baño de electrolito, destinadas a condensar la neblina. Sin embargo, la empresa nacional Same Ltda., especializada en ventilación industrial y control de emisiones contaminantes a la atmósfera, ha propuesto con éxito una nueva solución que disminuye las emisiones fugitivas tradicionales y que consiste en campanas individuales de alta energía, ubicadas sobre cada una de las celdas componentes de una nave EW y conectadas a una red de ductos que transporta las neblinas ácidas a un equipo de retención. Durante el desarrollo de la Ingeniería Conceptual del Proyecto de Lixiviación Los Bronces y previo a su implementación, se efectuaron pruebas a escala 1:1 en la nave EW de la planta de óxidos en el área el Soldado.

Asimismo, es importante mencionar la reciente tecnología desarrollada en conjunto por ENAMI y el Cimm, motivo de una patente de aseveración, relacionada con el proceso de

desarsenizado que aumenta la eficiencia en la extracción del arsénico y al mismo tiempo evita la generación de arsina (gas tóxico). Además, el nuevo proceso cuenta con medidas extremas de seguridad, que permite abatir cualquier traza de arsina que pueda generarse por eventuales defectos operativos. (CEPAL, Reformas Económicas, Serie N° 53).

LITERATURA

1. Araneda, Jorge: Innovaciones tecnológicas en la fundición Caletones División El Teniente, Codelco-Chile.
2. Arratia, Rubén L.: Precios y Costos en la Industria minera "Lecciones del Siglo XX", Diciembre 2000.
3. Gaete J., Maturana H., Katz J., Cáceres J., Cárdenes K.: Conceptos e Ingeniería Básica de la Metalurgia Extractiva. Cepal, Reformas Económicas N° 53. Instituciones y Tecnología en el Desarrollo Evolutivo de la Industria Minera. Marzo 2000.
4. Minería Chilena N° 243: "El Proceso Cuprochlor", Valiosa Alternativa para la Lixiviación en pilas de Sulfuros de cobre (Pág. 41 a 46). Septiembre 2001.
5. Mousse Nicole: Cepal, Reformas Económicas N° 4. El Desarrollo de la Minería del Cobre en la Segunda Mitad del Siglo XX. Noviembre 1999.

Recenzent: Prof. Pedro Riesgo Fernandez

Abstract

The refined copper consumption has had one narrow relation with the economic and vegetative growth of the population, but analyzed the consumption by means of the index "Intensity of metals" We can observe that in the industrialized economies this indicator is decreasing. These economies have had access to: recycled substitutes of copper, products and have minors consumption necessities. The present work raises that a form to remain effective in the markets is by means of the investigation of new technologies that allow to accentuate forts economic advantages forehead to substitutes, and conyunctural recessions. The properties of copper, and the efforts of the mining industry are analyzed to maintain their leadership.

ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 2002
Seria: GÓRNICTWO z.254 Nr kol. 1563

Stanisław DUŻY
Politechnika Śląska, Gliwice

ANALIZA PODPORNOŚCI OBUDOWY CHODNIKÓW PRZYŚCIANOWYCH W STREFIE WPŁYWU CZYNNEGO FRONTU EKSPLOATACYJNEGO

Streszczenie. W referacie przedstawiono analizę podporności obudowy wyrobisk przyścianowych w strefie wpływu czynnego frontu eksploatacyjnego. Obliczenia statyczne obudowy chodników przyścianowych przeprowadzono opierając się na modelowaniu numerycznym przy wykorzystaniu metody elementów skończonych. Przeprowadzone obliczenia wykazały, że obudowa skrzyżowania chodnika przyścianowego ze ścianą, mimo stosowanych konstrukcji wzmacniających lokalnie, w wyniku demontażu łuku ociosowego, może mieć podporność mniejszą niż samodzielna obudowa ŁP wykonana w warunkach pojedynczego wyrobiska.

ANALYSIS OF ASSESSMENT OF THE YIELD LOAD OF A LONGWALL GATE SUPPORT IN AREAS INFLUENCED BY AN ACTIVE EXTRACTION FRONT

Summary. The paper presents analysis of assessment of the yield load of a longwall gate support in areas influenced by an active extraction front. The finite element method was used to construct a numerical modelling solution for the structural analysis of the longwall gate support. As the calculations show, notwithstanding the use of locally reinforcing elements, the yield load of a face end support may be decreased, due to removal of the side arch, to such extent that it is lower than the yield load of a "normal" ŁP support installed in a single mine working.

1. Wprowadzenie

Chodniki przyścianowe są bardzo ważnym ogniwem procesu wydobywania kopalin użytecznych. W nich bowiem realizowane są podstawowe czynności technologiczne, takie jak transport urobku, transport materiałów niezbędnych do prowadzenia eksploatacji, ruch załogi,