

VISITA EXPERIMENTAL EFECTUADA A LA EMPRESA

• MINERA SAN CRISTÓBAL (MSC) SUBSIDIARIA DE SUMITOMO CORPORATION

PROVINCIA NORLÍPEZ DEPARTAMENTO DE POTOSÍ

(Actividad académica del taller de grado Carrera de Química Industrial)

Emigdia Marina Quispe Arapa*
Oswaldo Valenzuela Méndez**

Resumen

Minera San Cristóbal MSC es una empresa de clase mundial que complementa la eficiencia, la productividad y el entorno de seguridad en el trabajo para el proceso de la minería a cielo abierto y también la hidro metalurgia para concentrados (plomo-plata) y (plata zinc) con la tecnología moderna y especializada bajo estándares internacionales.

La visita experimental permitió observar y confirmar que todos los procesos están diseñados para: maximizar el retorno económico a la empresa, minimizar el impacto ambiental, continuamente monitorear la salud de sus trabajadores y la asistencia computarizado y automatizado en la implementación de tecnologías de explotación minera; que llevó a compartir esta información de vinculación tecnológica en el ámbito académico.

PALABRAS CLAVES

Empresa de clase mundial, explotación minera a cielo abierto, hidro metalurgia, flotación sulfuros de plata, cinc y plomo. ISO: 17025, 9000, 14000, empresa saludable.

Abstract

Minera San Cristóbal MSC is a world class company that complements the efficiency, the productivity and the safety occupational environment for the open pit mining process of exploitation and also the hydrometallurgy for concentrates (lead-silver) and (zinc silver) with modern and specialized technology under international standards.

The experimental visit made it possible to observe and confirm that all processes are designed to: maximize the economic return to the company, minimize environmental impact, continuously monitor the health of their workers and computerized and automated assistance in implementing mining technologies; that led to share this information of technological linkage in academia.

KEYWORD:

World-class company, open pit mining, hydro metallurgy, flotation sulphide silver, zinc and lead, ISO: 17025, 9000, 14000, healthy company.

Resumo

Minera San Cristóbal MSC é uma empresa de classe mundial, que complementa a eficiência, a produtividade e o ambiente ocupacional segurança para o processo de mineração a céu aberto de exploração e também a hidro metalurgia para concentrados (chumbo-prata) e (prata-zinco) com tecnologia moderna e especializada acordo com as normas internacionais. A visita experimental foi possível observar e confirmar que todos os processos são projetados para: maximizar o retorno econômico para a empresa, minimizar o impacto ambiental, monitorar continuamente a saúde de seus trabalhadores e assistência informatizado e automatizado em implementação de tecnologias de mineração; que levou a compartilhar essas informações de vinculação tecnológica na academia.

PALABRAS-CHAVES:

Empresa de classe mundial, mineração a céu aberto, hidro metalurgia, flotação de sulfureto de prata, zinco e chumbo. ISO: 17025, 9000, 14000, empresa saudável.

Article history: Received 07 august 2014. Style revision: 15 august 2014. Accepted: 08 september 2014

INTRODUCCIÓN



Figura 1. Minera San Cristóbal MSC Nor Lípez - Potosí.

Fuente: Elaboración propia sobre cartografía Microsoft Encarta 2008

Entre las variadas actividades académico-pedagógicas que actualmente se implementan en las Universidades y Centros Tecnológicos para el mejoramiento continuo del proceso enseñanza aprendizaje, se tiene la visita experimental o traslado desde un lugar a otro, para observar y asimilar "in situ" las actividades productivas que se desarrollan en los diferentes centros primarios de explotación y de manufactura industrial que conforman el sistema productivo del país.

Considerando para esta oportunidad la visita experimental efectuada a la empresa Minera San Cristóbal MSC ubicada en la Provincia Nor Lípez del departamento de Potosí de 30 estudiantes del taller de grado y dos Docentes de la Carrera Química Industrial, autores del presente artículo.



Fotografía 1. Estudiantes y Docentes vistiendo bandas de seguridad industrial interior de planta MSC. Crédito: E. M. Quispe 2014

Si bien la visita fue evaluada internamente a través de informes realizados por los estudiantes. La importancia de las actividades de explotación mining open pit¹ bajo normas ambientales de clase mundial que se desarrollan en esta empresa, nos ha motivado para puntualizar y compartir a continuación los siguientes aspectos.

¹ **Mining Open Pit**, tipo de explotación minera a cielo o tajo abierto que se desarrolla desde la superficie del terreno profundizando por terrazas descendentes.

DESARROLLO

Explotación del Open pit de Minera San Cristóbal MSC

La localidad de San Cristóbal (Nor Lípez-Potosí) fue conocida por su abundante minería de la plata desde los tiempos de la Colonia alrededor de 1500. Las tres zonas del yacimiento actual *Jayula*, *Tesorera* y *Ánimas* se encuentran en el centro de una cuenca sedimentaria volcánica con 226 Mega toneladas métricas de sulfuros como reserva probada para 17 años de explotación [1], prevaleciendo los minerales: *argentita* Ag_2S , *esfarelita* ZnS y *galena* PbS .

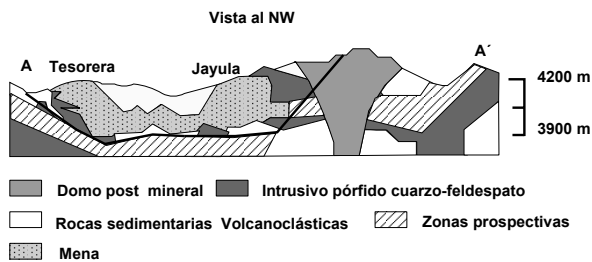


Figura 2. Sección transversal del yacimiento limitado desde Tesorera a Jayula. Fuente: elaboración propia para impresión en grises de <http://www.minerasancristobal.com/en/wp-content/uploads/2011/04/Seccion-transversal-esquem%C3%A1tica-del-yacimiento.jpg>

Mineralización caracterizada por vetas, vetillas y diseminaciones (cortas), que geológicamente constituyen un yacimiento mineral muy extenso (~5 Km. diámetro) pero de baja ley: 16,80 kg Zn, 5,30 kg de Pb y 51 gramos de Ag por tonelada métrica [1]. Aspecto que derivó en la aplicación de métodos mining open pit de cono flotante, en contra posición con los métodos tradicionales de minería subterránea de mayor costo.

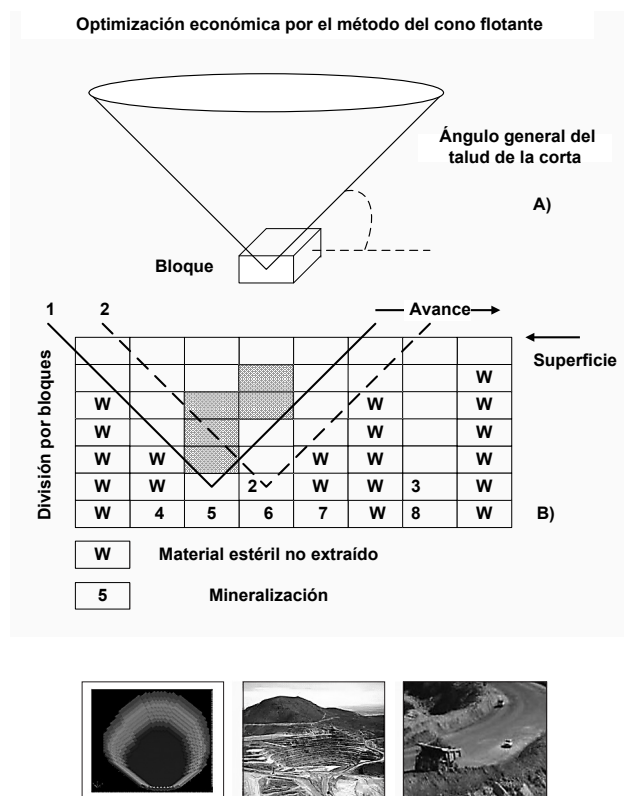


Figura 3. Procedimiento del cono flotante, representación algorítmica, desarrollo del pit óptimo y finalmente la maquinaria para la extracción-transporte del material mineralizado y estéril.

Fuente: Elaboración propia sobre información [2], [3], [4]

El diseño y la planificación de la explotación minera a cielo abierto, utiliza principalmente el método de optimización del cono flotante² de la Mineral Reserves Associates (MRA), Modalidad heurística de trabajo generalizada que permite explotar yacimientos de baja ley, aplicando, diferentes algoritmos que tienen como objetivo optimizar la explotación y buscar el máximo beneficio del yacimiento. El material extraído a cielo abierto siguiendo el análisis del cono flotante en tres dimensiones (alto, ancho, profundo) puede generar la geometría final del pit (hoyo), analizando la construcción geométrica cónica en dirección inversa y moviendo su vórtice de un bloque de mena a otro.

En la figura 3, se ilustra de manera general parte del procedimiento del cono flotante³, la representación interfase computacional algorítmica, el desarrollo del pit óptimo y finalmente la maquinaria-transporte para la extracción del material mineralizado y estéril. Los límites finales de un open pit pueden ser determinados aplicando algoritmos de optimización de cono flotante y también aplicando el procedimiento de Lerchs-Grossmann entre otros procesos iterativos, desarrollados a través de programas computacionales que muestran las prospectivas de explotación y logística correspondientes para manejarse como información de sustento en los trabajos de diseño y planificación que se ejecutaran en los sitios de explotación.

Explotación open pit MSC y asistencia computacional

La planificación general y de todas las operaciones de explotación se administra y analiza recurriendo al paquete de programas informáticos *MineSight*. Software que genera modelos tridimensionales de reservas, tipología de las mineralizaciones, rutas de acceso al open pit. La figura 4, muestra una aplicación del paquete *Minesight* para el despliegue de barrenos, similar al usado en la planificación de MSC.

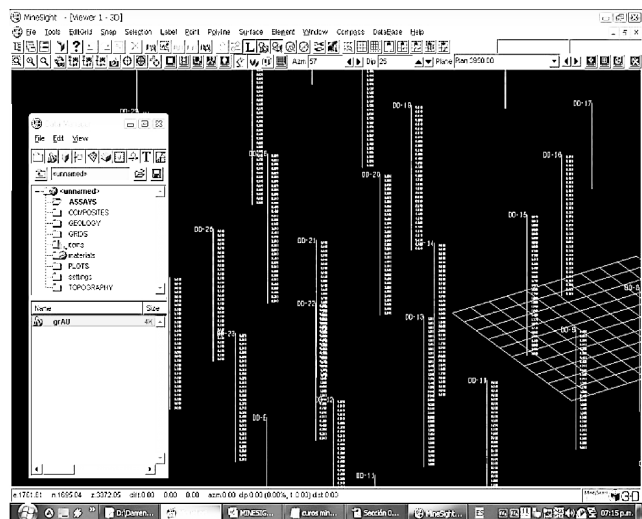
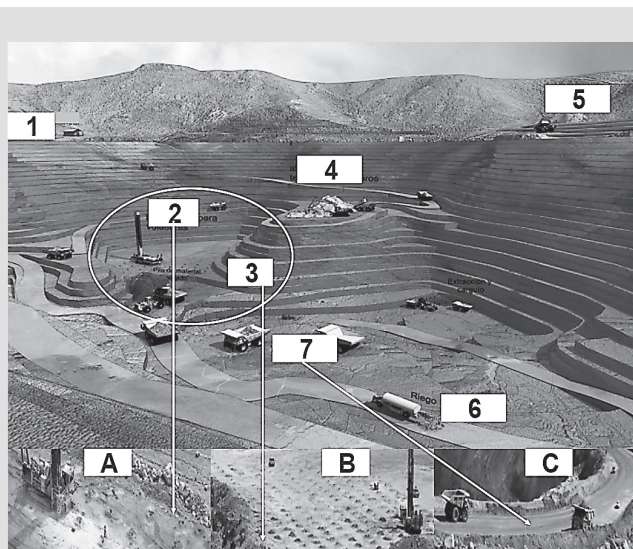


Figura 4. Aplicación del paquete Minesight para el despliegue de barrenos (minado), similar al usado en la planificación de MSC. Fuente [4]

² Cono flotante, procedimiento matemático heurístico basado en procesos iterativos y algoritmos de optimización para determinar los límites operativos, de un open pit (hoyo abierto), a través de distintos programas computacionales prospectivos de cálculo.

³ Las cortas son explotaciones mineras tridimensionales de yacimientos que avanzan en profundidad y su morfología es similar a la de un cono invertido. Para extraer de las cortas (mineral y material estéril), se procede aplicando perforación y voladura. La relación entre la cantidad de material estéril que se debe remover respecto a la ley del mineral explotable, condiciona el aumentar la profundidad de la corta, así, el ratio se incrementa y los costos de excavación del estéril hacen aumentar los costos de explotación.



Referencias:

(1) Oficina Dispatch control visual proceso general.

(A) Delimitación de zonas según el tipo de mineralización y el contenido de mineral, se demarcan las zonas con estacas y cintas que se colocan en el suelo antes de la perforación y la voladura.

(2) Diferenciación de categorías: Sulfuro de baja ley, Sulfuro de alta ley Óxido de baja ley, Óxido de alta ley, Material de transición, Material de desecho. Este trabajo de categorización es responsabilidad del equipo de levantamiento topográfico que utiliza equipos de medición GPS en su trabajo.

(3) Zona de perforación y minado, pozos de voladura.

(B) Esta actividad se realiza con equipos de perforación modernos, que pueden penetrar la roca a una velocidad de cerca de 1 metro por minuto que siguen un reticulado de 7 a 10 m dependiendo del tipo exacto de roca que se debe extraer en cada lugar. En todo el proceso de perforación, se toman muestras de roca para análisis de laboratorio químicos especiales para determinar de la mejor forma posible el contenido de los elementos y la ley de cada elemento de interés económico (Ag, Zn y Pb). MSC, utiliza un sistema de "voladuras silenciosas" para romper las rocas en el área meta del open pit, utilizando cantidades mínimas de explosivos para destruir y disgregar la roca madre sin llegar a proyectar las explosiones a gran distancia.

(4) Separación y almacenamiento de sulfuros visualización de zonas cintas de colores.

(5) Separación y almacenamiento de óxidos. En área separada por no tener la infraestructura in situ para concentrar este tipo de mineral.

(6) Rociado de agua por cisterna para disminuir el impacto del material sólido particulado (polvo) en la zona de trabajo.

(7) Transporte de las cargas sulfuradas, minerales y estériles

(C) En Minera San Cristóbal MSC, diariamente se remueven alrededor de 150000 TM de material rocoso que transportado en camiones volqueta CAT 789 y 785 con una capacidad de cargado de aproximadamente 200 toneladas cada uno, llegan hasta la planta de trituración, donde el material estéril y el mineralizado se separan, depositando el material estéril en las áreas designadas para el almacenamiento de desmontes, y conduciendo el material mineralizado (~ 40000TM diarias) hasta la planta de concentración a través de una correa transportadora de 1,7 km. de longitud.

Figura 5. Proceso minero open pit MSC.

Fuente: Elaboración propia sobre datos y esquema de [5]

En consecuencia, Los departamentos de Mina y Geología de MSC, supervisan toda la explotación del open pit incluyendo las siguientes tareas que son la columna vertebral del proceso:

1. Planificación general en el sitio⁴.
2. Reticulado del área a explotar
3. Perforación de pozos de voladura
4. Coordinación análisis químico de muestras (áreas nuevas)
5. Delimitación de los bloques mineralizados
6. Extracción y transporte de materiales

Aplicando métodos y procedimientos técnicos de vanguardia para obtener información precisa y confiable principalmente sobre: el muestreo, los análisis de laboratorio, la cartografía geológica y los levantamientos topográficos del open pit de MSC. Por otra parte la explotación requiere de equipo y maquinaria de alta especialización para remover grandes cantidades de rocas sedimentarias (150000 TM de material rocoso por día) que transportadas en camiones de 200 toneladas de capacidad llegan hasta la planta de trituración. La figura 5, representa a través de un esquema las tareas inherentes a la explotación minera de MCS.

Disgregación mecánica

El material extraído del open pit, por efecto de la drástica remoción sobre la roca madre, llega hasta los camiones volqueta de transporte con diversos tamaños que es necesario disminuir y homogeneizar, para este propósito se comienza llevando el material hasta la trituradora primaria (Chancadora⁵).

El objetivo de la trituración primaria es reducir el tamaño hasta un diámetro promedio cercano a 15 cm., medida que se adecua a las condiciones y capacidad de los otros dispositivos tecnológicos componentes de la batería de disgregación mecánica. 2300 TM por hora de material triturado sale de la chancadora, para ser transportado 1,7 km. a través de una correa transportadora y almacenarse en el *stockpile*⁶, que a manera de un gran promontorio cónico se deposita desde una altura de 43 m., para evitar que el polvo contamine la zona, el *stockpile* ha sido cubierto con un domo metálico.

La fotografía 2, muestra el domo metálico conjuntamente con el ingreso del material triturado por la parte superior a través de la cinta transportadora.



Fotografía 2. Domo metálico conjuntamente se observa el ingreso del material triturado por la parte superior a través de la cinta transportadora. Crédito [6]

⁴ En MSC la oficina de control en sitio, se denomina Dispatch y es responsable por el control visual completo de todo el proceso minero, desde la extracción hasta el transporte a la planta procesadora.

⁵ El equipo de trituración se complementa con un detector de metal equipado con un separador magnético, una rompedora hidráulica para quebrar las rocas de gran tamaño que no pueden ingresar a la boca del triturador y un sistema de supresión de polvo. La capacidad de la planta trituradora es de 2200 toneladas por hora.

⁶ Stockpile o pila de almacenamiento.

El domo al interior, también está provisto con aspersores de agua que riegan el material para disminuir la propagación del polvo que se genera por la caída del material hacia pila de almacenamiento. Se complementa el transporte del material, cargando éste a través de tres buzones a otra correa transportadora de menor longitud, que lleva la carga hasta la sección molienda.

El domo metálico de MSC [7]

En el año 2011, MSC concluyó la construcción de una estructura metálica especial (domo) para cubrir el área de de almacenamiento mineral stockpile y a través de esta estructura, reducir significativamente la dispersión del polvo por efecto de los fuertes vientos (120 a 150 km.h^{-1}) que se manifiestan en la zona de almacenamiento.

Características: El domo⁷ tiene una dimensión de 140 m. de diámetro, con una altura mayor de 59 m. , La estructura principal está diseñada para resistir ráfagas de vientos ($\sim 150 \text{ km.h}^{-1}$ y sobrecargas por granizo o nieve de 110 kg.m^{-2}). La construcción del domo, en el campamento Toldos, es parte de una política medioambiental orientada al aprovechamiento racional de recursos tales como el agua y la mitigación de efectos ambientales.

Las fotografías 3, 4, 5 y 6 muestran el stockpile descampado y la cinta transportadora, el armado de la araña, estructura del domo antes y armado estructural (domo de mitigación ambiental) posterior.



Fotografías 3, 4, 5 y 6. Stockpile descampado y cinta transportadora, armado de la araña, estructura del domo antes y armado estructural (domo de mitigación ambiental) posterior. Créditos [1], [5], [6]

La trituración primaria *stockpile*, por medio de correas transportadoras menores, llega hasta zona de molienda fina conformada por un molino SAG⁸ (semi-autógeno), dos

molinos de bolas, bancos de ciclones que recirculan y clasifican el mineralizado por tamaño de la carga. El material seco proveniente de la pila de almacenamiento se mezcla con cal para regular el pH durante el proceso.

Esta mezcla ingresa al molino semi autógeno SAG, donde se inicia el proceso de la molienda. Al interior del molino SAG (diámetro de $36 \text{ ft} \sim 11 \text{ m.}$), el material seco se mezcla con agua durante la molienda. Material molido más agua (pulpa) que sale del molino SAG y pasa a un tamiz cilíndrico denominado trommel. La carga gruesa es recirculada al molino SAG por un sistema de correas transportadoras y la carga fina es vertida a un cajón del cual que alimenta a dos molinos de bolas, cada uno con un diámetro de $22 \text{ ft.} \sim 6,71 \text{ m.}$, dispuestos en paralelo y que operan en circuito cerrado junto con dos baterías de hidrociclones capaces de clasificar la pulpa en dos fracciones. Ver Figura 6 y 7.

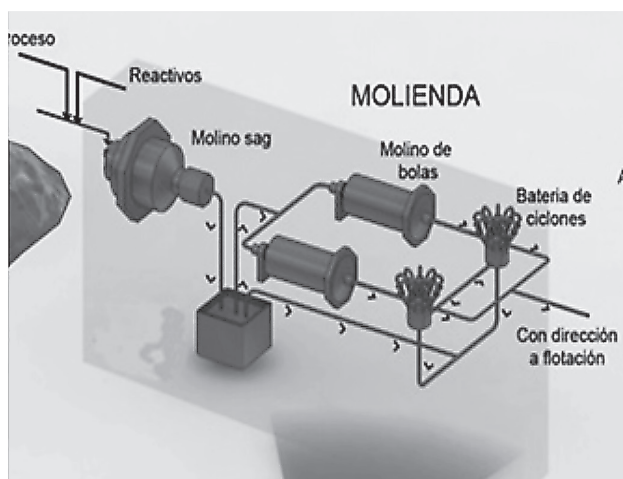
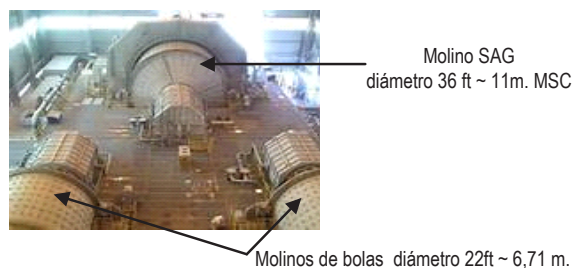


Figura 6. Baterías de disgregación mecánica MSC. Fuente: [5]



Ventajas de los molinos SAG:

Mejora la estructura del mineral obtenido. Buena liberación con un mínimo de finos. Relaciones de reducción de $1000:1$. Simplifica varias etapas de disgregación mecánica y molienda, Reduce las instalaciones de manejo, clasificación, almacenamiento intermedio, etc. (ahorro de equipos). Reducción de costes de mantenimiento.

Bajos desgastes metálicos: 1 Kg. Por TM de carga tratada.

Figura 7. Molino SAG y Molinos de bolas MSC. Fuente [7], [8]

⁷ Estructura metálica de aluminio, conformada por 25184 arañas, cada araña está conformada por 3 tubos y un conector de aluminio que se van armando mediante códigos. Armado de propiedad de Geométrica S.A. México. La obra fue concesionada a la constructora boliviana Metalúrgica "Carlos Caballero" SRL aplicando normas internacionales ISO 9001, OSHAS 18001, ISO 14001 y la Guía ISO 26000. [7]

⁸ La molienda autógena es un método de disgregación y reducción de tamaño que utiliza el mismo material como medio molidor, es decir, trozos de la mena que se procesa. Cuando a esta acción propia del material se acompaña con la acción de bolas aceradas pasa a convertirse en molienda semiautógena (SAG). En consecuencia, un molino semiautógeno se caracterizan: por su gran diámetro en comparación con el largo. Por su alimentación con cargas de dureza significativa provenientes de un chancado primario conjuntamente con una cantidad de bolas de acero de tamaños mayores a 3 pulgadas, agregadas entre un 4 y 15% del volumen total del molino. Por involucrar tres tipos de mecanismos simultáneos sobre la molienda: impacto, compresión y abrasión. Por su mayor potencia y tamaño que los molinos de bolas. La molienda semiautógena contribuye a pasar directamente desde el chancado primario a la flotación, sin tener que utilizar etapas intermedias de chancado secundario y terciario para reducir el tamaño de la carga.[8], [9]

Los tipos de accionamiento empleados usualmente para molinos de bolas y semiautógenos son: 1.- Accionamiento mediante piñón corona. 2.- Accionamiento mediante motor anillo y cicloconvertor: de mayor uso en los molinos semiautógenos debido a que solo utiliza un motor anillo, el **rotor** se acopla directamente al tambor del molino y el **estator** toma la forma de anillo. El rotor se acopla a la fundación y es activado mediante un cicloconvertor o cicloconvertidor de **electrónica de potencia** que permite convertir la alimentación trifásica de frecuencia de la red (50 Hz o 60 Hz.) en una alimentación de baja frecuencia y baja velocidad adecuada para el funcionamiento del molino. 3.- Accionamiento mediante variador de velocidad: para potencias más bajas, se utiliza a veces en lugar del cicloconvertor un variador de velocidad. [9]

La fracción gruesa retorna a molienda y la fracción más fina (diámetro igual o menor a $0,1\text{ mm.}$) es enviada hasta la planta hidrometalúrgica de flotación diferencial, donde son aislados dos tipos de concentrados: plomo-plata y cinc-plata.



Fotografía 7. Docentes y estudiantes al final de la batería de disgregación mecánica. Crédito: ME. Quispe A. 2014

Planta hidrometalúrgica de flotación diferencial

Para separar los minerales del material estéril, es necesario reducir el tamaño del material (disgregación mecánica intensiva) que permite separar las partículas de sulfuros. El proceso se inicia al mezclar la pulpa con agentes espumantes (surfactantes), y agua, en recipientes especiales, conformando una batería de *celdas de flotación* donde se agita la mezcla y se introduce aire a presión para formar de pequeñas burbujas, por efecto de reactivos espumantes como el MIBC y el F150 y reactivos modificadores como el óxido de zinc, cianuro de sodio, silicato de sodio y sulfato de cobre, que promueven la adherencia de las partículas del mineral que se desea seleccionar. Así, el mineral es arrastrado hasta la superficie con la espuma, y es retirado de las celdas de flotación. Por las características propias del mineral que se procesa hidro metalúrgicamente, primero se realiza la flotación del sulfuro de plomo utilizando *Aerophine 3418A* y *Flotec 2200 LF* y posteriormente el sulfuro de cinc aplicando *Danafloat 468* y *Flotec 2041*. [5]



Fotografía 8 y 9. Celdas de flotación. Concentrado mineral flotado. Crédito [5]

La hidro metalurgia en circuitos de cinco celdas en serie proporciona tres productos: concentrados, mixtos y colas.

- Los concentrados se envían al proceso de espesamiento y filtrado.
- Los mixtos, en los cuales el mineral no ha podido todavía ser extraído completamente, pasa a un proceso de remolienda y clasificación, desde donde el material fino es

enviado al circuito de flotación donde el concentrado es finalmente extraído.

- Las colas son enviadas al espesador y luego al depósito de colas.

El mineral flotado al ser retirado de las celdas arrastra un porcentaje elevado de agua, en consecuencia, para separar el líquido, se procede a decantar-flocular-neutralizar la mezcla utilizando estanques metálicos circulares denominados espesadores. Fotografías 10.



Fotografías 10. Espesador. Crédito [5]

Decantados y floculados Los concentrados de *zinc-plata* y de *plomo-plata* en los *espesadores*, son enviados por separado al área de filtración, donde se extrae el agua residual, utilizando dos circuitos de prensas horizontales independientes calientes que disminuyen la humedad por debajo del 10%. El agua recuperada en este proceso es bombeada al área de flotación para su reutilización. Concluida la filtración en caliente, el concentrado sólido está listo para su carguío y transporte por vía férrea hacia los puertos chilenos de Antofagasta y Mejillones. Un esquema del proceso hidrometalúrgico se muestra en la figura 8.

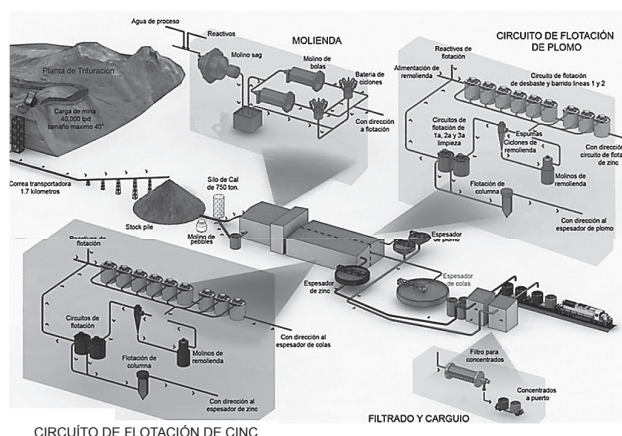


Figura 8. Esquema general disgregación mecánica e hidrometalurgia.

Fuente: <http://www.minerasancristobal.com/es/wp-content/uploads/2011/04/Esquema-planta-Trituracio%CC%81n.jpg>

Manejo de fuentes hídricas en MSC [10]

La planta hidrometalúrgica de flotación, para su abastecimiento permanente de agua, cuenta con 10 pozos de bombeo de agua

industrial (no utilizable para: riego o consumo humano y animal) enclavados en el acuífero *Jaukiahua* perteneciente a la microcuenca del mismo nombre y ubicado a una distancia aproximada de 10 km al sud del área de operación.

El agua para el uso del campamento y de la comunidad de San Cristóbal, proviene de un pozo de la misma cuenca, pero que es tratada por *ósmosis inversa* para su potabilización.

Con relación al acuífero *Jaukiahua*, MSC posibilitó un estudio científico⁹ (2010 a 2011), utilizando procedimientos exactos de medición geofísica, geoquímica, hidrológica, hidrogeológica y de datación radiométrica.

Resultados de la investigación:

- La metodología de investigación, tomo en cuenta: visitas de campo, toma y análisis de muestras de agua, revisión de estudios existentes sobre el acuífero, estudios geológicos y sondeos geofísicos, datación radiométrica (determinación de la edad de las aguas en el acuífero), elaboración de un modelo geoquímico relacionado con las aguas subterráneas del área de influencia, y la prospectiva del acuífero aplicando un modelo numérico predictivo para determinar su comportamiento en función del tiempo de explotación.
- Contrariamente a lo que se pensaba, las aguas subterráneas de la cuenca *Jaukiahua* tienen su origen en precipitaciones pluviales producidas en zonas montañosas con alturas superiores a los 4000 m., consecuentemente no son de origen fósil. Por otra parte, Se estima que la recarga proveniente de la cima de la montaña de San Cristóbal a la Cuenca *Jaukiahua*¹⁰ es de unos 1400 m³ . día⁻¹.
- La simulación numérica permitió establecer que, ajustando las tasas de bombeo en cada pozo a un consumo promedio de 39000 m³ . día⁻¹ (1000 m³ . día⁻¹ menor al índice 2011), al cabo de los 17 años de vida útil del yacimiento. MSC podría haber usado menos del 50% del volumen total del acuífero, esperando que la recuperación del volumen inicial se produzca en aproximadamente 50 años, tiempo que desde la perspectiva hidrogeológica es razonable. Adicionalmente, MSC cuenta con un sistema de recirculación (depósito de colas), con el que actualmente se recuperan 8000 m³ . día⁻¹, para ser usados nuevamente en la planta de concentración. A futuro se está trabajando en un proyecto para incrementar la recuperación de agua.
- El depósito de colas *Huaylla Khara* ubicado en una cuenca natural, hidrológicamente cerrada, no tiene descarga a otras cuencas y no produce efluentes en la zona. Estudios especializados que se han realizado en la microcuenca de *Huaylla Khara*, tanto por especialistas nacionales como internacionales, han demostrado que las colas o desechos

producto del proceso metalúrgico están aisladas del entorno en forma natural. Debido a que la plataforma de esta microcuenca es conformada por rocas de la Formación Potoco (arcillas altamente impermeables que presentan coeficientes de permeabilidad equivalentes a los coeficientes de las geomembranas impermeables).

- Alrededor de 25 pozos ubicados en el área de influencia de las operaciones mineras, tienen un monitoreo permanente que permite medir la calidad, caudal y nivel del agua y reportar estos resultados, en informes periódicos de control que son enviados a las autoridades competentes para su verificativo a través de inspecciones ambientales.
- El estudio confirmó además la existencia de recursos hídricos con diferentes calidades de uso industrial en las zonas del propio acuífero *Jaukiahua*, río grande y río salado. En relación con fuentes de agua apropiadas para consumo humano, animal y/o riego, se identificaron potencialmente las aguas de *Villa Mar*, *Alota*, *San Agustín* y *Calcha K*, que fluyen hacia el Salar de Uyuni y se evaporan, fuentes hídricas que están ubicadas por fuera del área de operaciones de MSC.

Producción

- La mina produce aproximadamente 1300 TM por día de concentrados de cinc-plata y 300 TM por día de concentrados de plomo-plata, para llegar a un volumen estimado de producción anual de 600000 TM de concentrados.

MSC, empresa de clase mundial [11], [12], [13], [14]

Todos los procesos están diseñados para: maximizar el rendimiento económico para la empresa, minimizar el impacto ambiental, monitorear permanentemente la salud de sus trabajadores y la asistencia computarizada y automatizada en la aplicación de tecnologías mineras siguiendo normas internacionales muy exigentes. En consecuencia, MSC, revisa los procesos regularmente, con un mantenimiento rutinario y controles de calidad. Bajo normas ISO, entre las que destacan: el gestor *LIMS Laboratory Information Management System* de *Thermo Fischer*, que trabaja la automatización del laboratorio con la captura y el análisis rápido de datos muestrales a través de la integración de los instrumentos de análisis de última generación y el software correspondiente.

Este gestor de datos es parte de haber implementado la norma ISO 17025,¹¹ por otra parte están las normas (ISO 9000, 9001, ISO 14001),¹² y OHSAS 18001.¹³ A estas

⁹ Conformado por: Leman Consulting Group (contraparte local), profesionales japoneses de la Universidad de Kumamoto (asesores), profesores de la Facultad de Geología Universidad Autónoma Tomás Frías de Potosí (fiscalizadores); y por representantes de organismos del Estado: Ministerio de Minería y Gobernación de Potosí (observadores). [10]

¹⁰ Ubicada dentro la zona de las concesiones mineras de MSC, tiene una extensión de 62 km² y pertenece a la cuenca del Salar de Uyuni, la cual tiene una extensión total de 63390 km². En consecuencia, el área de aporte de la microcuenca *Jaukiahua* representa una pequeña parte del área total de la cuenca del Salar de Uyuni. Aguas subterráneas, salinas y con un elevado contenido de sedimentos, no aptas para el riego ni para el consumo humano o animal. El único uso económico y técnicamente factible es el uso industrial. [10] El acuífero *Jaukiahua*, debido a la naturaleza de los sedimentos (gravas y arenas) de reciente formación, su acumulación de fuentes pluviales y lacustres del cuaternario e intercambio hídrico en sistema abierto, no se puede clasificar como una fuente de agua fósil. Debido a que las aguas fósiles son aquellas que han sido confinadas subterráneamente en conjunto con sedimentos de arrastre y ha permanecido así, en sistema cerrado por procesos geológicos de sellado que impiden su recarga por muchísimo tiempo. [10]

Las comunidades de la región usan las vertientes de agua dulce superficiales como fuentes de agua potable. Estas aguas dulces no son utilizadas en ninguna medida por MSC para su proceso de flotación metalúrgica; son de uso exclusivo de las comunidades y habitantes de la zona. [10]

¹¹ International Organization for Standardization ISO 17025 aplicada por los laboratorios de ensayo y calibración con el objetivo de demostrar que son técnicamente competentes y capaces de producir resultados técnicamente válidos. [11]

¹² ISO 9001: 2008, norma que establece los requisitos para la implementar un Sistema interno de Gestión de la Calidad (SGC) en las organizaciones de manera general para fines contractuales. Dependiendo del país, puede denominarse la misma norma "ISO 9001" de diferente forma agregándose la denominación del organismo que la representan dentro del país: NB-ISO 9001:2008 Bolivia. ISO 9001: Contiene los requisitos del modelo de gestión. ISO 9004: Contiene a la antigua ISO 9001, y además amplía cada uno de los puntos con más explicaciones y casos, e invita a los implantadores a ir más allá de los requisitos con nuevas ideas, esta apunta hacia la eficiencia del sistema. ISO 19011 en su nueva versión 2011: detalla los requisitos para la realización de auditorías de un sistema de gestión ISO 9001 y también para el sistema de gestión medioambiental establecido en ISO 14001. [12] ISO 14001 es una norma internacional aceptada para implementar un Sistema de Gestión Ambiental (SGA) efectivo. La norma está planteada para conseguir como objetivo un equilibrio entre el mantenimiento de la rentabilidad, la reducción de los impactos en el ambiente y el apoyo de las organizaciones. ISO 14001 va dirigida a las empresas que están buscando reducir los impactos en el ambiente y cumplir con la legislación en materia ambiental. [13]

¹³ La certificación OHSAS 18001 Occupational Health and Safety Assessment Series, es una norma internacional voluntaria para evaluar el desempeño de organizaciones en cuanto a salud y seguridad. Su propósito es apoyar a las empresas en el control y reducción de los riesgos laborales de salud y seguridad. [14]

certificaciones se suma la *ISO/IEC 27001* referida con la seguridad de información.

Finalmente MSC, es de acuerdo con la norma boliviana *NB 512 2001:2008 una empresa saludable*, denominativo que establece que se ha cumplido con una serie de acciones integrales de asistencia, prevención y promoción de la salud, tanto para los trabajadores de la empresa, como también para la salud de los pobladores que viven en comunidades circundantes a las instalaciones de MSC.

CONCLUSIONES

- Minera San Cristóbal es una empresa catalogada de clase mundial porque conjunciona la eficiencia y productividad del proceso minero open pit explotación-concentrados (plomo plata) y (cinc plata) con tecnología moderna y especializada bajo normas internacionales. Aspectos que se observaron y confirmaron muy de cerca en la visita experimental efectuada, y que motivaron compartir esta información de vinculación tecnológica en el ámbito académico.

Agradecimientos

A los ejecutivos de MSC por aceptar la visita, y en especial al responsable guía de planta: Ing. Andrés Martínez, por la exposición sobre aplicación de Sistema de Seguridad Industrial en planta, los procesos de explotación- disgregación mecánica - flotación de sulfuros, mitigación y minimización del impacto ambiental, etc.



Sala de control computarizada [5]



SGC Norma ISO 9001 [5]



Operaciones automatizadas SGC [5]



Laboratorio de ensayos y calibración gestor LIMS. ISO 17025 de certificación [11]



El Gerente de MSC, recibiendo el certificado Empresa saludable 2014 [15]

Referencias bibliográficas:

[1] es.wikipedia.org/wiki/Minera_San_Cristóbal, Case Study Customer Minera San Cristóbal S.A. Utilizes Thermo Scientific Sample Manager LIMS™ for Laboratory Integration and Automation, (Consulta: 05/08/14),

[2] Morales, C., optimización económica de explotaciones a cielo abierto, optimización de pits mediante el método de cono flotante es.scribd.com/doc/73245335, (Consulta: 03/08/14),

[3] Vallejo García, M.N., Baquero Chiquita, J.G., Franco Sepúlveda, G., Open Journal Systems Vol. 45 N° 32 2005, análisis de los algoritmos de optimización minera: cono flotante y lerchs-grossmann utilizando gemcom surpac y upl. Grupo Planeamiento Minero Facultad de Minas Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, Colombia,

[4] MineSigh + manual [1] xa.yimg.com/kq/groups/20782644/661230934/name/Mine... Archivo DOC. Vista Web Mine sigh, (Consulta: 03/08/14),

[5] www.minerasancristobal.com/.../planta-de-concentracion-del-mineral. (Consulta: 30/07/14),

[6] <http://www.minerasancristobal.com/en/wp-content/uploads/2011/05/Minera-San-Cristobal-Dome-1.jpg>, (Consulta: 03/08/14),

[7] www.minerasancristobal.com. Minera San Cristóbal estrena domo de mitigación de polvo September 19th, 2011 | Comunicados de Prensa | (Consulta: 03/08/14),

[8] www.uaecrusher.tk/chancadoras/u_f63_51824.html molinos semiautógenos molino semiautógeno (SAG) | Videos Portal de Noticias.COM Mill Sag - Molinos Semiautógenos - Mech. Eng. MAAH, (Consulta: 30/07/14),

[9] procesaminerales blogspot.com/2012/09/molinossemiautogenos.html Molinos autógenos (o semiautógenos): se caracterizan por una relación largo / diámetro de 0,521, basada en el gran diámetro requerido para aumentar el efecto de molienda. (Consulta: 03/08/14),

[10] www.minerasancristobal.com. Presentan estudio sobre uso de recursos hídricos subterráneos de San Cristóbal March 2nd, 2012 | Comunicados de Prensa | (Consulta: 03/08/14)

[11] http://es.wikipedia.org/w/index.php?title=ISO_17025&oldid=74264558, (Consulta: 03/08/14),

[12] http://es.wikipedia.org/w/index.php?title=ISO_9001&oldid=76812878, (Consulta: 03/08/14),

[13] http://es.wikipedia.org/w/index.php?title=ISO_14000&oldid=75863808, (Consulta: 03/08/14),

[14] es.wikipedia.org/wiki/OHSASOHSAS (Occupational Health and Safety Assessment Series). OHSAS 18001, (Consulta: 03/08/14),

[15] La Razón Edición Impresa, 07 de septiembre de 2014. San Cristóbal es la primera minera saludable del país. La Paz - Bolivia, (Consulta: 03/09/14)

(*) Licenciada en Química Industrial, Docente Carrera de Química Industrial, Facultad de Tecnología - UMSA.

(**) Licenciado en Química Industrial, Docente y actual Director Carrera de Química Industrial, Facultad de Tecnología - UMSA.