

Avances tecnológicos en la concentración de minerales

Antonio Salas Casado
Octavio Hinojosa Carrasco

Carrera de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales
Universidad Técnica de Oruro
salasdeviaje@yahoo.es

Resumen

En la gestión de empresas dedicadas al procesamiento de minerales resulta, hoy en día, de gran prioridad el control de los costos de producción, eficiencia en los resultados metalúrgicos y el control ambiental, para minimizar impactos negativos. Paradójicamente, estos tres cuidados de una eficiente gestión de empresas, vienen ligadas con el tipo de tecnología utilizada en las plantas de procesamiento.

En este trabajo se muestran los avances tecnológicos que han alcanzado la aplicación industrial y que podrían ser aprovechados por la minería nacional para hacerla más competitiva. Se describen los nuevos procesos de trituración, molienda, clasificación, concentración gravimétrica y concentración centrífuga.

Palabras clave: Concentración de minerales, trituración, molienda, clasificación, concentración gravimétrica

Technological advances in the mineral concentration

Abstracts

In the management of companies engaged in mineral processing, it is now a high priority the control of production costs, the efficiency in the metallurgical results and the environmental control to minimize negative impacts. Paradoxically, these three cares for an efficient management of companies, are linked with the type of technology used in processing plants.

In this paper, the technological advances that have reached industrial application and could be used by the national mining to make it more competitive are shown. The new processes of crushing, grinding, classification, gravimetric concentration and centrifugal concentration are described.

Keywords: Minerals' concentration, crushing, grinding, classification, gravimetric concentration.

Avanços tecnológicos na concentração de minerais

Resumo

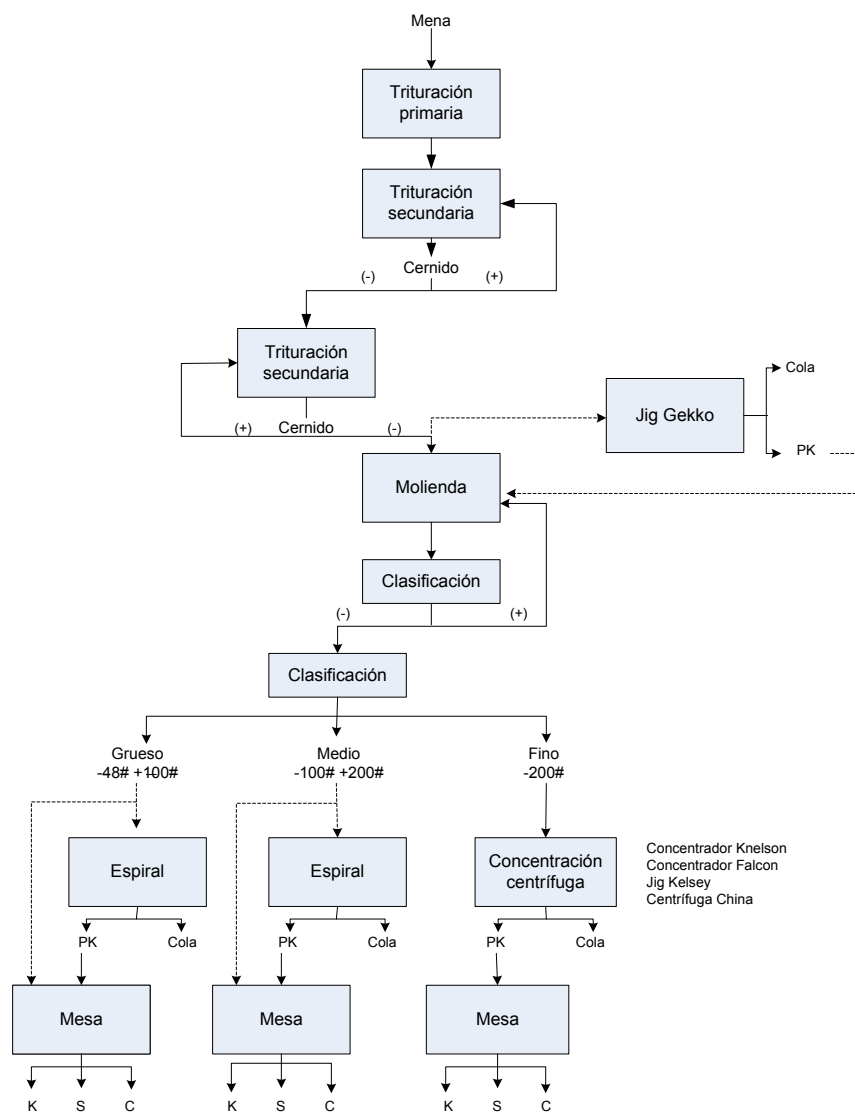
Na gestão de empresas envolvidas no processamento de minerais, hoje é de alta prioridade o controle de custos de produção, a eficiência nos resultados metalúrgicos e o controle ambiental para minimizar os impactos negativos. Paradoxalmente, estes três cuidados em uma eficiente gestão de empresas, estão relacionados com o tipo de tecnologia utilizada nas plantas de processamento.

Neste artigo se apresentam os avanços tecnológicos que alcançaram aplicação industrial e que poderiam ser usados pela mineração nacional para torná-lo mais competitivo. Descrevem-se os novos processos de trituração, moagem, classificação, concentração gravimétrica e concentração centrífuga.

Palavras chave: Concentração de minerais, trituração, moagem, classificação, concentração gravimétrica.

Esta publicación sólo pretende recopilar aquellos adelantos tecnológicos que aunque no sean de reciente data, su incorporación al esquema productivo ha permitido a las empresas alcanzar índices de producción y/o productividad bastante superiores a los que obtenemos en nuestras empresas, como la que registra el ingenio San Rafael de MINSUR en el Perú; esta empresa procesa 2,700 TPD de mena estañífera con ley de cabeza promedio de 4% Sn, en una

Si consideramos la secuencia de operaciones unitarias comunes en una planta de procesamiento de minerales, como se muestra en el diagrama de bloques de la figura 1, podemos utilizar este esquema para describir algunos de los avances tecnológicos que deseamos resaltar en esta revisión.



Revista Metalúrgica N°34, 2013, Carrera de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales UTO

2. Avances en tritución de minerales

La literatura especializada reporta, entre otros, los siguientes avances tecnológicos en la etapa de tritución de minerales [3].

- Estrategias de desarrollo para la desintegración de materiales por pulsos eléctricos.
- Control de la molienda autógena usando análisis de imágenes.
- Simulación y control avanzado del tratamiento en trituradoras giratorias de cono.
- Modelación geometalúrgica en el circuito de la molienda en Collahuasi.
- Influencia de la granulometría de alimentación en el proceso de conminución en trituradoras de alta presión.
- En cuanto a nuevos equipos tritución se refiere, el énfasis del desarrollo se orientó a incrementar la capacidad de tratamiento y disminuir el consumo de energía, en esa dirección hay dos equipos que podrían ser introducidos en la minería nacional: la prensa de rodillos y los molinos por agitación Isamill.

2.1. Prensa de rodillos abrasivos de alta presión (HPGR)

Las prensas de rodillos abrasivos de alta presión (HPGR) se introdujeron como una nueva tecnología de molienda en 1984; desde entonces, se instalaron con éxito en un amplio número de plantas en todo el mundo, principalmente para cemento y piedra caliza.

Recientemente, los HPGR también se aplicaron en plantas de procesamiento de minerales, en su mayor parte para el tratamiento de minerales de hierro y diamantes. En estas industrias, la aplicación de HPGR abarca desde la tritución de gruesos, por ejemplo, la tritución de tamaños superiores a 62.5 mm (2.5"), de pebbles de circulación de la molienda autógena (AG), hasta la molienda fina de material <100 μm , y altos valores Blaine en la preparación de pellets para la siderurgia.

El molido de alta presión se obtiene por medio de un tipo avanzado de rodillo abrasivo. Contrariamente a los rodillos convencionales para tritución, las partículas se rompen por compresión en un lecho de partículas relleno y no por medio del prensado directo de las partículas entre los dos rodillos. Este lecho de partículas se crea por presión entre dos rodillos de rotación opuesta. Entre estos rodillos, se presiona un lecho de partículas a una densidad de hasta aproximadamente el 85% de la densidad real del material, ver figura 2 [4].

Esta compresión se obtiene por medio de la aplicación de alta presión, hasta casi 300 Mpa; un proceso que excede la resistencia a la compresión del material de alimentación. Durante este proceso de compactación, el material se tritura con una amplia distribución de tamaños de partículas y con una gran proporción de material fino, compactados que se descargan de la trituradora en forma de escamas.

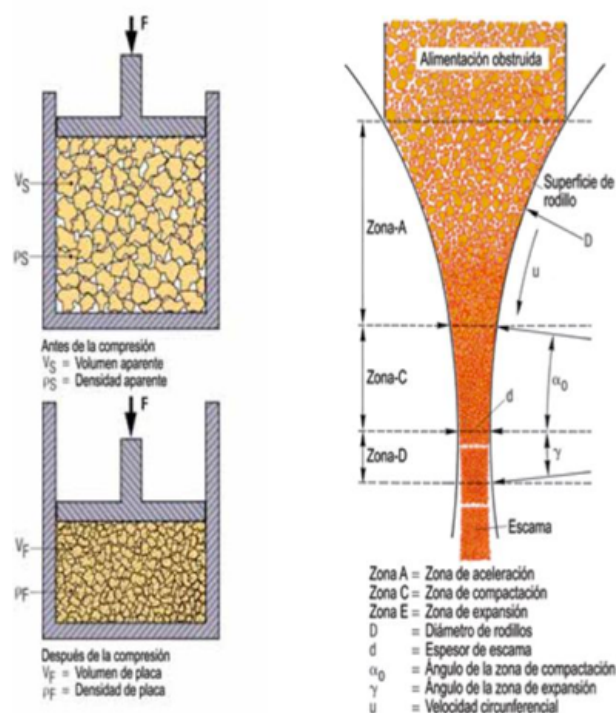


Figura 2. Esquema demostrativo de la tritución en prensa de rodillos [4].

El proceso de rotura se puede contemplar en dos etapas diferentes. En la primera etapa, el material que ingresa al espacio ubicado entre los rodillos se somete a una aceleración para alcanzar la velocidad periférica del rodillo. Como resultado del estrechamiento entre los rodillos, el material se compacta en forma gradual y las partículas más grandes se someten a un proceso de tritución previo; además, se manifiesta un cierto grado de reordenamiento de partículas, que llenan los huecos presentes entre partículas. En la siguiente etapa, el material sometido a un tritución previo, ingresa a una zona de compactación, esta zona involucra un espacio entre los rodillos definida por un sector que posee un ángulo de aproximadamente 7°. En esta zona de compresión se aplica la presión. La fuerza de presión actúa principalmente sobre todas las partículas que atraviesan la zona de compresión, a través de contactos de puntos múltiples entre las partículas en el lecho de compresión. Esto da como resultado la desintegración de la mayor parte de las partículas.

Durante el proceso, se generan micro fisuras dentro de las partículas, y esto da como resultado el debilitamiento de dichas partículas para la siguiente etapa de molienda. La presión que se ejerce sobre un lecho de partículas reduce el desgaste de los rodillos, debido a que el procedimiento principal de molienda no se produce entre la superficie del rodillo y el material, sino que tiene lugar entre las partículas de material dentro del lecho de partículas, figura 3 [4].

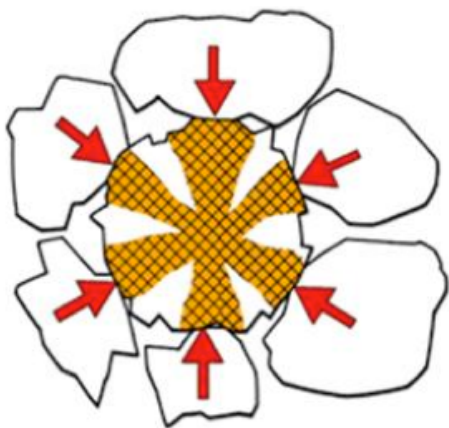


Figura 3. La trituración se produce entre partículas minerales.

Un rodillo abrasivo de alta presión produce una distribución de tamaño de partículas (PSD, por sus siglas en inglés) más amplia y con una mayor cantidad de partículas finas que la distribución producida por un triturador terciario, por ejemplo un triturador de cono, figura 4. La razón es que la fuerza de compresión no sólo actúa en el extremo grueso de la PSD, sino a lo largo de todo el lecho de partículas, tanto en partículas gruesas como finas, incluidas las partículas finas derivadas de las fracciones inicialmente más gruesas.

La fuerza de la presión ejercida por los rodillos provoca, en el lecho del material a triturar, diversas microfisuras como resultado de las tensiones diferenciales dentro de los granos, así como entre los minerales y la roca estéril circundante y por efecto de este comportamiento se produce una molienda selectiva a lo largo de la zona de contacto entre fases diferentes de los cristales.

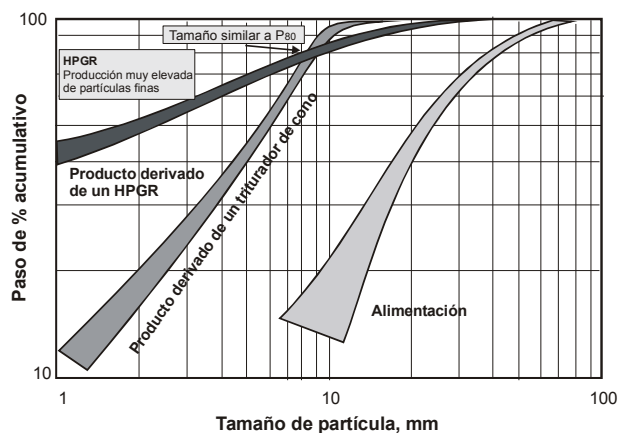


Figura 4. Comparación de la distribución de tamaños de partículas [4].

Cuando se combina un HPGR con una etapa posterior de molienda, las microfisuras inducidas dan como resultado una reducción entre 10% y 25% del índice de trabajo de Bond, lo que resulta en un considerable ahorro de energía que es

bastante significativo cuando se procesan menas duras, figura 5. Para la mayor parte de los minerales, el consumo específico de energía oscila entre 0.8 y 3.0 kwh/t.

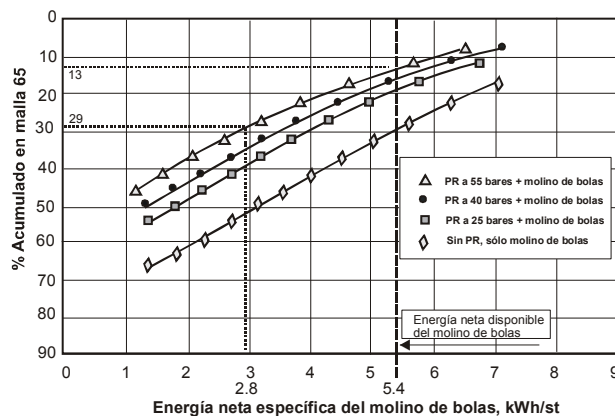


Figura 5. Comparación de la reducción del Índice de Trabajo de Bond [4].

La capacidad de un HPGR se calcula con las siguientes relaciones:

$$Q = q \times D \times W \times v \quad (1)$$

$$Q = s \times W \times v \times r \times 3.6 \quad (2)$$

Donde:

Q = Capacidad calculada para el HPGR, t/h

q = rendimiento específico, ts/m³ h

D = Diámetro del rodillo, m

W = Ancho del rodillo, m

v = Velocidad periférica del rodillo, m/s

r = densidad de la escama de descarga, t/m³

s = espesor de la escama, mm

Los HPGR se usan actualmente en numerosas aplicaciones industriales [4, 5].

2.2. Molinos de agitación de alta intensidad IsaMill

“El problema del uso ineficiente de la energía en la conminución era tan serio, que la nueva tecnología que hiciera posible la conminución bajo la malla 200 (74 micrómetros) a la mitad del requerimiento energético de los molinos convencionales justificaría un premio Nobel por servicio a la humanidad.” Alban Lynch and Don McKee (1981)

Este enunciado muestra cuán grande era la necesidad de diseñar nuevos tipos de molino que reemplacen a los tradicionales molinos de bolas, y en ese intento aparecieron los molinos de torre y más recientemente los molinos de agitación de alta intensidad IsaMill, que han superado a los molinos de torre por tener mayor eficiencia energética y utilizar medios de molienda más pequeños.

2.2.1. Mecanismo de molienda

El IsaMill™ es un molino cerrado. La pulpa viaja a través del molino en un patrón de “flujo pistón” por entre los discos de molienda [6, 7]. Los medios recirculan entre los discos

rotatorios que distribuyen la acción de molienda por el IsaMill™.

La molienda se realiza mediante la fricción y la abrasión de las partículas en contacto con los pequeños medios de molienda que circulan a gran velocidad.

En el extremo de descarga del IsaMill™, la pulpa y los medios de molienda llegan al separador de producto patentado. Los medios de molienda se centrifugan hacia la periferia de la carcasa y se bombean de regreso con algo de pulpa al extremo de alimentación del molino. Esta acción retiene los medios de molienda en el IsaMill™, sin la necesidad de harneros o cribas finas mientras que la descarga de pulpa molida sale del centro del separador del producto, figuras 6 y 7.

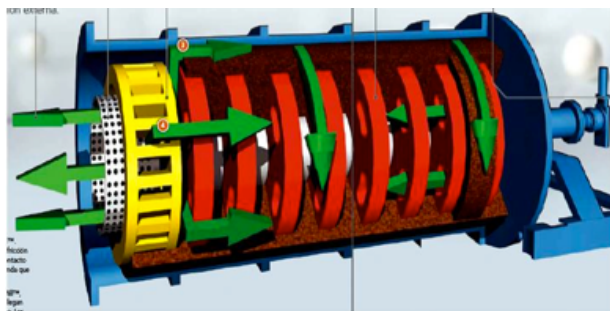


Figura 6. Esquema ilustrativo de la dirección de la pulpa y cuerpos molturantes.

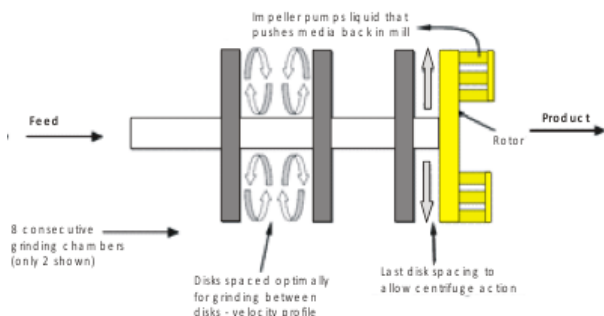


Figura 7. Esquema ilustrativo de la parte interna del molino [8].

3. Avances en clasificación

La clasificación granulométrica es una operación unitaria fundamental en una planta de procesamiento de minerales, principalmente en los circuitos cerrados de molienda y clasificación, en operaciones de concentración gravimétrica donde normalmente se utilizan ciclones y/o clasificadores hidráulicos isodrómicos.

Un avance en los procesos de clasificación lo constituyen las cribas de alta frecuencia de la Corporación Derrick que ha desarrollado un sistema de clasificación Stack Sizer para clasificación húmeda de granos finos hasta 100 micrones y un sistema de recuperación sólida de finos Hi-G Dryer.

3.1. El stack sizer

Es un diseño de cedazos vibratorios en uno o varios pisos que funcionan en paralelo, accionados por un sistema vibratorio dual con dos motores de alta frecuencia de 2.5 HP que proporcionan un movimiento lineal uniforme de la criba en dirección perpendicular a los cedazos. Se clasifican pulpas por medio de un distribuidor de pulpa a 5 ductos de alimentación a los cedazos de uretano, figura 8 [9].

Una novedad adicional de estas cribas es el sistema de chisquetes de lavado de agua dirigidos a bateas repulpadoras revestidas de caucho y situadas entre los paneles en cada piso de la clasificación.

Entre las ventajas que se atribuyen a esta máquina, cuando se la emplea para cerrar un circuito de molienda, se mencionan las siguientes:

Aumenta el tonelaje entre un 10 y 30% según el tipo de mineral y el grado de molienda.

Disminución de la carga recirculante evitando la sobre molienda.

El retorno de la inversión es muy corto, debido al incremento de la producción utilizando el mismo molino y sin incrementar la potencia instalada.



Figura 8.- Clasificador stack sizer

Un ejemplo de la inclusión de este equipo en Los Queñuales S.A. (Perú) y de los resultados obtenidos se presenta en la siguiente figura:

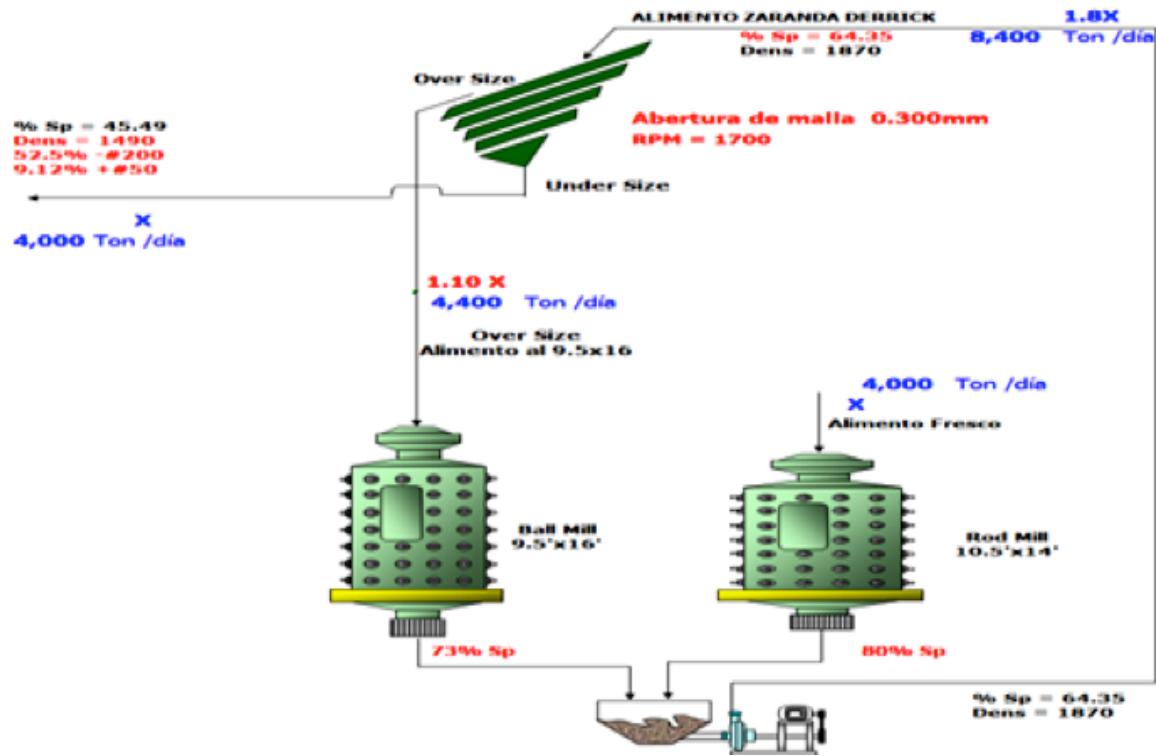


Figura 9. Molienda-clasificación (stack sizer) en Los Queñuales, Perú [10].

Tabla 1. Balance metalúrgico comparativo sin clasificación stack sizer y con clasificación stack sizer [10].

Balance Metalúrgico global: 01 abril al 12 Octubre 2010

Antes del cambio

			Ensayes químicos					Distribución				
	TMS		% Zn	% Pb	% Cu	Ag o/t	% Fe	Zn	Pb	Cu	Az oz	Fe
Cabeza	652,428	100.00%	11.33	0.98	0.16	0.69	23.69	100.0	100.0	100.0	100.0	100.00
Conc. Zn	133,307	20.43%	51.71	0.72	0.61	1.32	11.07	93.26	14.95	75.66	46.26	9.53
Conc. Pb	7,917	1.21%	6.58	57.68	0.68	13.59	7.62	0.70	71.18	5.06	28.20	0.39
Relave	511,205	78.35%	0.87	0.17	0.04	0.19	27.29	6.04	13.87	19.28	25.54	90.08
Cab. Calc.	652,428	100.00%	11.33	0.98	0.16	0.58	23.73	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

Balance Metalúrgico global: 07 diciembre 2010 al 31 de enero 2011

Después del cambio

			Ensayes químicos					Distribución				
	TMS		% Zn	% Pb	% Cu	Ag o/t	% Fe	Zn	Pb	Cu	Az oz	Fe
Cabeza	211,152	100.00%	10.90	1.08	0.15	0.62	24.67	100.0	100.0	100.0	100.0	100.00
Conc. Zn	41,779	19.79	51.76	0.72	0.61	1.18	11.14	93.99	13.25	75.30	39.95	8.71
Conc. Pb	2,384	1.34	6.79	59.01	0.58	14.70	8.51	0.84	73.54	4.84	33.83	0.45
Relave	166,540	78.87	0.71	0.18	0.04	0.19	29.15	5.17	13.21	19.86	26.22	90.84
Cab. Calc.	211,152	100.00%	10.90	1.08	0.16	0.58	25.31	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

3.2. El Hi-G dryer de Derrick

Es una máquina de espesamiento, que combina una vibradora con un sistema de vibración lineal unida a un cuerpo de hidrociclones de 4", que se alimentan con una presión de 35 a 37 psi. El deslamado en los ciclones produce un overflow que contiene lamas y arcillas muy finas que pueden ser llevadas a un circuito de espesamiento, floculación o clarificación y deposición final en un dique de colas.

El underflow de los ciclones con 55 a 60% sólidos, se alimenta a la vibradora de alta frecuencia que tiene dos motores de 2.5 HP a 1,750 RPM rotando en sentido inverso, que provocan una vibración lineal de 0.19" de amplitud que combinada a la frecuencia de rotación genera una aceleración de 7.3 G sobre la superficie de los tamices de uretano, resultando en una eficiente eliminación del agua de los sólidos del underflow de los ciclones, obteniéndose un producto desaguado con 75 a 80% sólidos, que puede ser depositado como pasta que no se segrega o transportado a un sitio de deposición final [10].

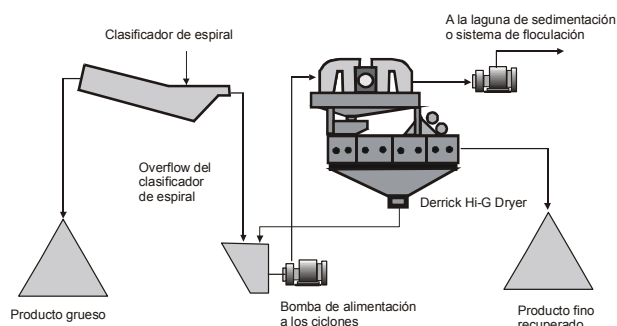


Figura 10. Esquema ilustrativo de la ubicación de un Hi-G Dryer, en una planta de beneficio [10].

4. Avances en concentración gravimétrica y centrífuga

Hay varios avances en los diseños y fabricación de equipos para la concentración gravimétrica, a tal punto que referirse en detalle a todos ellos amerita un artículo exclusivo por ello; nos referiremos tan sólo a los siguientes:

- Jigs presurizado Gekko (IPJ).
- Jig centrífugo Kelsey.
- Jig centrífugo Campbell.
- Nuevas espirales HC y alta capacidad o granulometría fina respectivamente.

4.1. Jig presurizado Gekko (Inline Pressure Gig)

El IPJ, es un jig circular de un hutch (tolva) simple con criba móvil, toda la unidad del jig está encapsulada y rodeada por una atmósfera presurizada como muestra la siguiente figura.

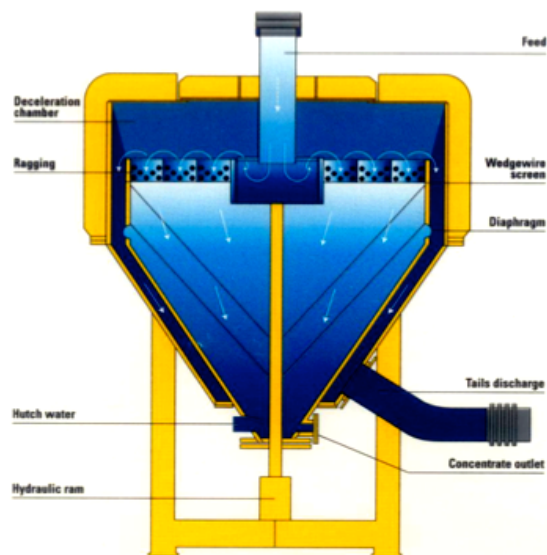


Figura 11. Esquema del jig presurizado Gekko [11].

La criba interna es accionada por un pistón hidráulico a través de un eje central vertical, que hace pulsar la criba móvil

mediante el diafragma inferior de goma flexible que conecta la caja de la criba móvil con el hutch.

El eje central se sella con tres retenes de goma, aislando totalmente el pistón hidráulico que queda fuera del hutch que incluso, puede ser colocado alejado del jig y servir para accionar varias unidades de jig Gekko simultáneamente.

La unidad, se alimenta bombeando la pulpa al tubo de alimentación en el centro de la criba que descarga en un distribuidor radial de carga hacia los distintos compartimientos de la cama, figura 12, controlándose la presión interna de la pulpa con la descarga de las colas.



Figura 12. Detalle de la cama y de los compartimientos de la cama [11].

Durante el ciclo de pulsión, el concentrado es inducido a descender por la cama del jig, pasar a través de la parrilla de la criba para caer continuamente en el hutch. Durante la succión la ganga es descargada radialmente por el borde externo, pasando gradualmente por los distintos compartimientos de la criba y cae en el espacio que queda entre el cono del hutch y el cono fijo externo de la carcasa del jig.

El diagrama de pulsión es asimétrico de dientes de sierra y puede ser regulado y/o modificado por el PLC que controla el trabajo del jig.

Este diseño de jig tiene tres innovaciones notables [11]:

La presurización interna del jig, permite varios beneficios:

Creación de un área sobre la cama (zona de desaceleración), que se llena de pulpa de alimentación donde se reduce la velocidad transversal del flujo y se crea un ambiente pasivo para la sedimentación incrementando significativamente el tiempo de retención de la ganga para permitir mayor recuperación.

Eliminación de la tensión superficial al no existir una superficie libre sobre la cama como en los demás tipos de jigs, porque la cámara de desaceleración está siempre llena de pulpa.

Manejo muy flexible de la capacidad de pulpa de alimentación porque ambos productos (concentrado y colas), se descargan bajo la presión interna del jig y pueden ser dirigidos y/o transportados bajo ese efecto a la etapa siguiente del procesamiento.

La criba móvil, mejora tres funciones únicas que ocurren en este tipo de criba:

La posibilidad que tiene el operador de modificar el diagrama de pulsión y determinar el punto donde empieza a levantarse la criba (generando succión), y la opción de cambiar las aceleraciones que se generan durante el descenso de la criba (pulsión).

Las partículas son suspendidas al elevarse la criba todas al mismo punto en cada ciclo de pulsión, independientemente de la densidad de las partículas, y al finalizar el ciclo, la capa liviana es arrastrada hacia el borde de descarga sin que se produzcan huecos en la porosidad de la cama.

La energía cinética que se genera en cada punto del ciclo de pulsión se transmite directamente a todas las partículas de la cama, sin disipación ni pérdida de energía.

La criba circular y el hutch sin paredes de división radial que provoquen efectos negativos de rozamiento.

Entre las ventajas que se reconocen al jig presurizado Gekko figuran las siguientes:

Bajo consumo de agua de inyección y balance de agua favorable en todo el circuito de la planta.

Alta ley y elevada recuperación de concentrados

Requerimientos mínimos de molienda debido al amplio rango granulométrico que se puede alimentar al jig (<30mm en el modelo IPJ 2400).

Fácil retratamiento de productos en un segundo equipo sin necesidad de rebombar pulpas, pues se aprovecha la presurización de la primera unidad.

Bajos costos de inversión y operación debido a su alta capacidad de tratamiento y sólo dos piezas móviles (100 TPH en el modelo IPJ2400)

4.2 Jig centrífugo Kelsey

La figura 13, muestra un jig Hartz colocado horizontalmente en un campo centrífugo de eje vertical, para representar esquemáticamente la analogía que existe entre los fundamentos de la concentración en un jig clásico y los que se presentan en un jig Kelsey, figura 14, cuyo diseño mecánico y constructivo fue satisfactoriamente resuelto por Chris Kelsey en 1993 [1].

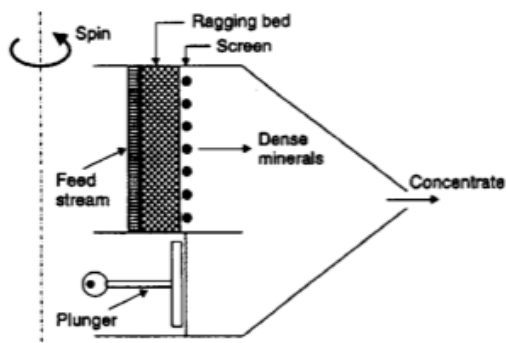


Figura 13. Jig Hartz colocado en un campo de un jig centrífugo de eje vertical.

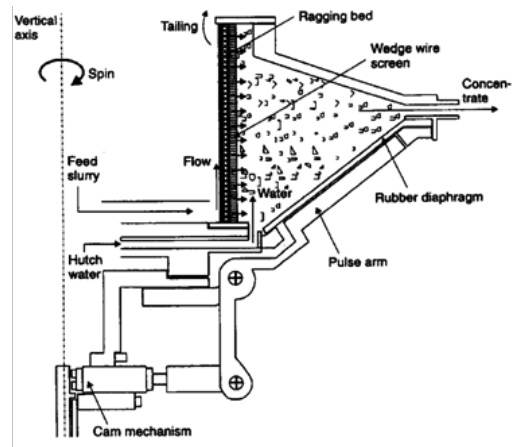


Figura 14. Esquema del diseño de un jig centrífugo Kelsey.

Como primera analogía se debe señalar que el jig Kelsey opera bajo los mismos principios de la concentración gravimétrica en un lecho pulsante por efecto de la dilatación de una cama provocada por el accionamiento de un diafragma, pero con diferencias muy significativas que marcan la semejanza, como por ejemplo: la aparición de la fuerza centrífuga que actúa sobre las partículas y la cama del jig, el régimen de pulsión de alta frecuencia incorporado por Kelsey, los materiales empleados en su construcción y las interacciones múltiples que se dan entre los principales parámetros de operación del jig, cuando adicionalmente, se puede modificar la aceleración a la que son sometidas las partículas.

4.2.1. Principio de operación

El jig Kelsey utiliza la misma tecnología del jig convencional a la que se añade el efecto de una fuerza centrífuga regulable que es varias veces superior a la aceleración de la gravedad (entre 60 y 300 veces más), lo que provoca un comportamiento distinto de las partículas minerales dentro de la cama del jig como si se incrementara la diferencia de densidad aparente entre las partículas, lo que provoca desplazamientos muy distintos entre partículas livianas y pesadas al interior del jig.

En la figura 15 y la tabla 2, pueden reconocerse los principales componentes del jig Kelsey, que son los mismos de un jig Hartz convencional con la diferencia de los detalles mecánicos constructivos que caracterizan al jig Kelsey.

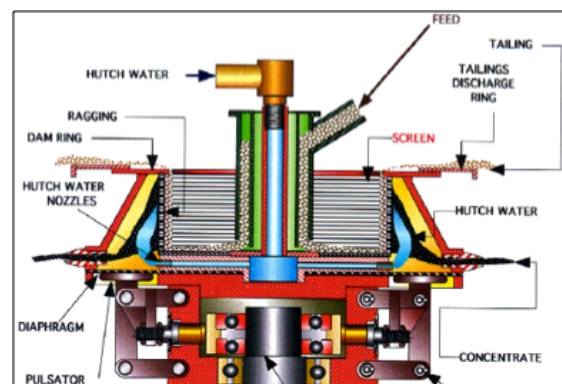


Figura 15. Esquema de construcción del jig centrífugo Kelsey.

Tabla 2. Características comparativas entre un jig convencional y el jig centrífugo Kelsey [1].

Jig convencional tipo Hartz	Jig centrífugo Kelsey
Cedazo (criba) plano fijo.	Cedazo (criba) rotatorio cilíndrico
Cama en posición horizontal sobre el cedazo.	Cama en posición vertical delante del cedazo.
Tolva (Hutch) fija debajo del cedazo.	Serie de tolvas (Hutches) cónicas rotatorias.
Alimentación continua directa lateral al jig	Alimentación continua por tubo central estacionario.
Distribución directa de la alimentación a través de la superficie de la cama.	Distribución de la alimentación a través de la superficie de la cama por intermedio de un disco rotatorio al fondo.
Agua de inyección directamente al Hutch por debajo del cedazo fijo.	Agua de inyección a través del tubo de alimentación hacia el Hutch por detrás del cedazo rotatorio.
Pulso, el número de pulsaciones es de baja frecuencia $150 < n < 250$.	Pulso, el número de pulsaciones es de alta frecuencia.
Amplitud de golpe, regulable entre $3 < h < 25.4$ mm.	Amplitud de golpe, regulable entre $0.2 < h < 2.6$ mm.
Aceleración fija sobre las partículas de 1 G.	Aceleración regulable sobre las partículas

4.2.2. Mecanismos de separación

El jig centrífugo Kelsey difiere de los jigs convencionales no sólo en el hecho de que la fuerza gravitacional ha sido incrementada por una fuerza centrífuga, sino también porque la fina granulometría del material de cama actúa como un medio pesado acentuando los tres mecanismos básicos de la concentración en jigs que son:

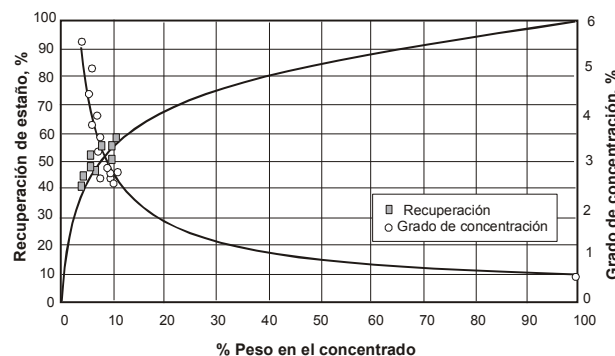
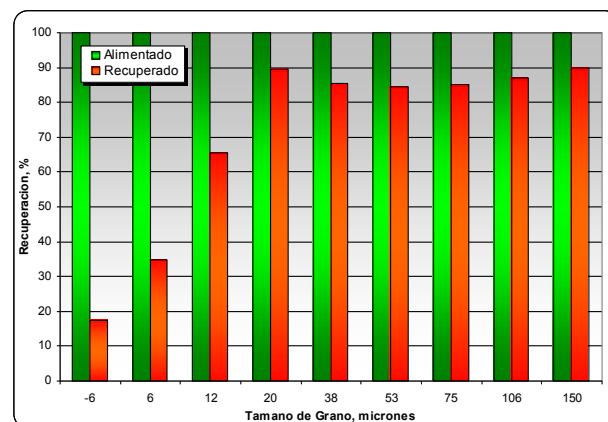
- Expansión de una cama pulsante
- Sedimentación con obstáculos
- Elutriación en contra corriente

4.2.3. Aplicaciones y resultados típicos

El jig centrífugo Kelsey se está utilizando con mucho éxito en el procesamiento de minerales de oro, estaño, tantalio, hierro, cromo, etc; también se ha probado este equipo con menas bolivianas de difícil procesamiento como son los minerales de San Florencio o las colas del ingenio de Caracoles.

La figura 16, muestran los diagramas de concentrabilidad que se obtuvieron al experimentar con la muestra estañífera de San Florencio [12].

Una gran ventaja del jig Kelsey es la posibilidad de recuperar partículas muy finas de minerales pesados, como fue el caso de las pruebas piloto con muestras del dique de colas "Caracoles" tal como se observa en el siguiente diagrama size by size[13].

**Figura 16.** Diagrama de concentrabilidad de una muestra del yacimiento a cielo abierto San Florencio [12].**Figura 17.** Diagrama size by size de recuperación de Sn en JCK 200 para la muestra colas Caracoles [13].

4.3. Jig centrífugo Campbell y Altair

Estos dos tipos de jigs centrífugos son muy similares y posiblemente tengan su origen en la patente del Dr. Campbell de la Universidad de Montana de 1991 [14, 15], se recomiendan para el procesamiento de partículas finas.

El principio de funcionamiento de estas máquinas es el efecto mecánico del jiging en un medio pulsante al que se añade la fuerza centrífuga por la rotación de la criba cilíndrica, lo que equivale a aumentar la diferencia de densidades entre las partículas.

La criba, el hutch y el mecanismo de pulsión que vienen integrados en el equipo son accionados por un motor controlado por un regulador de frecuencia. Se usan materiales plásticos de poliuretano de alta densidad y aceros inoxidables para resistir la abrasión y la corrosión.

Ambas máquinas pueden procesar de materiales de 14# a 500# (1,400 a 25 micrones). La alimentación se realiza en forma de pulpa por un ducto vertical central con ayuda de una bomba. Una vez que ingresa el material a la cámara del jig es proyectado contra la criba cilíndrica donde se forma una cama, los granos pesados atraviesan la cama y la criba y se descargan por el hutch que rodea la criba por detrás. Los granos livianos salen por rebalse de las capas superiores de la cama.

Para provocar el régimen pulsante se emplea agua de inyección que ingresa al hutch en régimen pulsante a diferencia de otros tipos de jigs donde la pulsión se consigue dentro del mismo hutch [14, 15, 16].

5. Nuevas espirales

La primera espiral Humphrey, fue introducida en el año 1945. El principio básico se ha mantenido hasta nuestros días, pero con evoluciones considerables en cuanto al diseño y técnicas de fabricación. Los materiales de construcción empleados han evolucionado desde la madera y hierro fundido hasta el poliéster reforzado con fibra de vidrio, pasando por aleaciones, hormigón, goma, etc.

Actualmente la mayoría de las espirales se construyen en poliéster reforzado con fibra de vidrio con recubrimientos de poliuretano, y éste proceso de fabricación relativamente sencillo, ha sido uno de los motivos del rápido avance en el diseño de estos separadores. Su campo de aplicación se ha expandido debido al desarrollo de espirales con canales de distinta sección en las que, además, el paso y el perfil cambian a lo largo de su longitud, figura 18. Existen en la actualidad una gran variedad de espirales, diseñadas en función del mineral a tratar y de las características específicas del proceso.

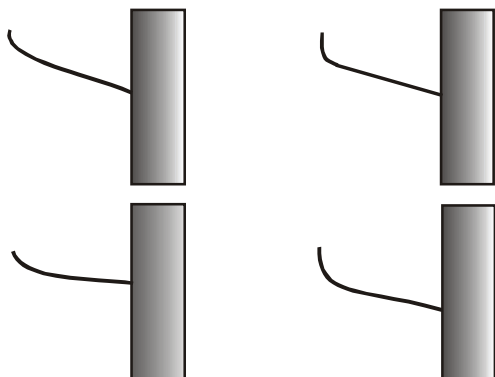


Figura 18. Perfiles de espirales [14].

Las espirales de diseño antiguo disponen de diversas tomas de concentrado a lo largo del canal, localizadas aproximadamente cada 180°, es decir cada media vuelta. Inmediatamente antes de cada toma existe una pequeña aportación de agua cuya función es desplazar las arcillas, efectuando un lavado del concentrado.

Posiblemente el mayor fabricante de espirales mundial sea la firma australiana MD mt, con un amplio abanico de modelos específicos para cada tratamiento particular. En numerosas ocasiones desarrollan modelos “privados”, para un cliente y problema concreto, como es el caso de la espiral modelo MG7S, suministrada a la empresa Consolidated Rutile Ltd. (CRL), para su proyecto Yarraman; espiral diseñada para retratar los estériles de las espirales existentes MG4B [17].

La actual generación de espirales no precisa aportación de agua (waterless), operando además a concentraciones de sólidos elevadas, del 30% al 50%, frente al 15% - 30% clásico. Además, y esta es la mayor innovación y ventaja, especialmente en

cuanto a flexibilidad de operación se refiere, los productos: concentrado, mixtos y colas, son separados al final del canal mediante unas cuchillas ajustables, lo cual simplifica enormemente el control y operación del equipo.

Las espirales empleadas en las etapas de limpieza y afino, debido a que tienen que tratar productos con alto contenido de pesados, más del 5%, poseen tomas intermedias de concentrado situadas cada dos o tres vueltas, figura 19, y en algunos modelos, puede aportarse agua para lavar el concentrado inmediatamente antes de la toma, y después de cada toma para efectuar un repulpado y repetir el proceso de concentración.

El número de vueltas varía entre tres y ocho, dependiendo de la aplicación y del modelo de espiral, siendo las más empleadas las de siete vueltas. La tendencia actual es el uso de espirales “cortas”, con cuatro vueltas en el caso del carbón, y seis vueltas en las espirales de minerales pesados, a fin de reducir la altura de las instalaciones.



Figura 19. Tomas intermedias de concentrado.

Recientemente se ha introducido un modelo de espiral que combina en una misma columna dos espirales, una primera sección de desbaste, y a continuación una segunda sección de limpieza del concentrado o del mixto obtenido en la primera sección, disminuyendo de este modo la altura total requerida.

Mejoras en el diseño, junto con la utilización de nuevos materiales más ligeros en su construcción, han permitido montar en una misma columna: uno, dos, tres, hasta cuatro y cinco canales dependiendo del modelo de espiral. Pueden prepararse “bancos” de espirales de hasta 12 columnas formando módulos muy compactos con hasta 36 canales, y capacidades del orden de 50 t/h a 120 t/h, ocupando un espacio muy reducido [17].

Los bancos se suministran con un distribuidor de pulpa y canaletas para la recogida de los productos, lo que permite una instalación fácil y rápida, siendo la relación capacidad/superficie ocupada mucho más favorable que para otros equipos como mesas vibrantes. Un punto de especial importancia es el diseño de los distribuidores que deben repartir la pulpa de alimentación, uniforme y equitativamente a los diferentes canales. La firma MD mt, ha desarrollado su distribuidor MK7

con el que se consigue un coeficiente de variación del orden del 3%. Además, el diseño de este distribuidor permite la apertura y cierre de canales en operación por razones bien sea de mantenimiento o de operación (reparto de carga), de un modo simple y rápido gracias a su accesibilidad, pudiendo inclusive ser automatizados, como se muestra en la siguiente figura.

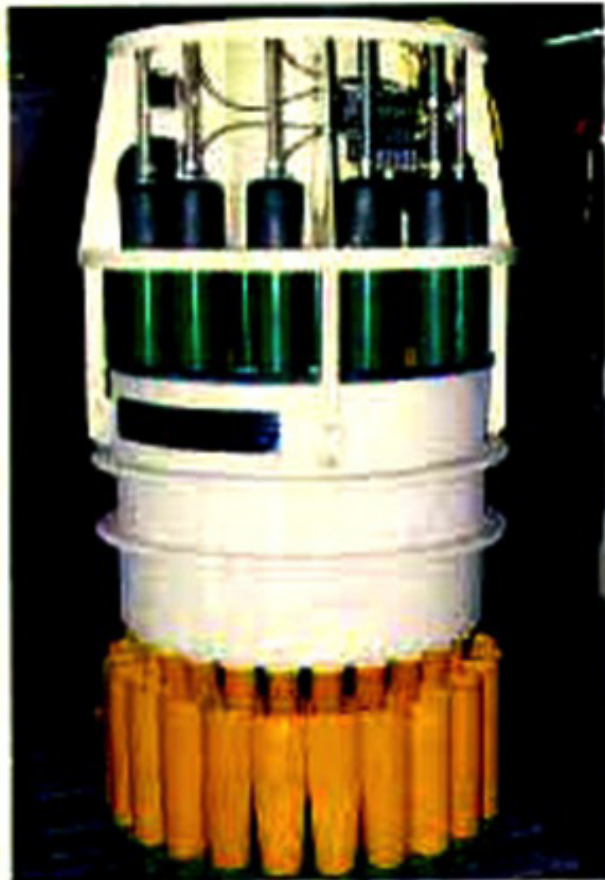


Figura 20. Distribuidor de pulpa cuádruplex y triplex.

La investigación en la operación de las espirales es continua y como resultado de ello han surgido nuevas mejoras en los modelos existentes, así como desarrollos para cubrir nuevos campos de aplicación. Tratando de hacer un resumen del rango actual de espirales construidas por MD mt, podrían considerarse dos grupos principales: minerales pesados y carbón, dentro de cada uno de los cuales podría establecerse la siguiente clasificación [17]:

5.1 Espirales especiales para minerales pesados

Espirales LG: para productos con bajo contenido de pesados, inferior a 5%, Low Grade. Aplicación en etapas de desbaste y barrido. Dentro de este subgrupo existen básicamente dos modelos, LG4 y LG7D.

Espirales MG: para contenidos medios de pesados, hasta 20%, Medium Grade. Aplicación en desbaste y limpieza. Modelos MG4B, MG4CF, MG5D, MG6.3, MG7S.

Espirales HG: para alto contenido de pesados, superiores al 20%, High Grade. Aplicación en limpieza y etapas finales de afino. Modelos HG7D, HG8-5, HG8-7, HG10.

Espirales WW: para aplicaciones específicas con baja diferencia de densidades entre mena y ganga, de diseño "convencional" con adición de agua de limpieza, Wash Water. Modelos WW2, WW3, WW6-5, WW6-7.

Espirales FM: para minerales de granulometría fina, Fine Mineral, figura 27. Modelo FM1.

Espiral PW1: de laboratorio para realización de ensayos.

Los principales minerales donde estas espirales pueden ser aplicados son: arenas minerales (ilmenita, rutilo y zirconio), minerales de hierro, cromita, estaño y wolframio, tantalio, oro, arenas silíceas (eliminación de pesados), piedra pómez, etc. En general la capacidad unitaria por canal puede estimarse entre 2t/h y 4t/h para las espirales tipo LG y MG, máximo 3 t/h para las HG, y menos de 2 t/h las FM. En cualquiera de estos tipos la concentración de sólidos en la alimentación puede llegar hasta el 50% en peso, aunque el mejor rango está entre 35% y 45%. El tamaño máximo de partícula recomendable no debe ser mayor de 2mm.

6. Conclusiones

Del análisis efectuado, en este trabajo, se pueden colegir las siguientes conclusiones:

Existen en el país grandes reservas de minerales de estaño como las colas granzas de la Planta Sink and Float de la E.M. Catavi, que son las reservas conocidas más grandes del mundo, que pueden ser aprovechadas usando nuevas tecnologías actualmente disponibles.

Es necesario e imperioso que la minería boliviana, principalmente en la minería estatal, incluidas las cooperativas, se modernicen introduciendo equipos de última generación para el tratamiento de minerales que hoy son de difícil recuperación con el empleo de equipos tradicionales.

Los equipos de última generación son caros en su implementación, pero sus costos de operación son muy bajos y su rendimiento elevado, posibilitando un rápido retorno del capital invertido.

Se debe aprovechar los precios altos que aún están vigentes en el mercado internacional de los metales ya que este ciclo puede llegar a su fin en los próximos años.

Bibliografía

GORDON I. Comunicación personal: Planta de Pitinga de 1,200 TPH en Taboca S.A, Brasil, Oruro- UTO, Metalurgia, 2008.

KRACHT, Willy. Procemin: 8th International Mineral Processing Seminar. Santiago de Chile, diciembre 2011, ISBN 978.956.8504.62.S.

KHD HUMBOLD, Excelentes soluciones en materia de minería – Weir Minerals. Brochure Wedag. 20120.

PATZELL, Norbert; KNECHT, Johann; KLYMOWSKY, Andre; Delgado, Claudio. “El ingreso al cobre de los HPGR”. Minería Chilena 2012.

ISAMILL, Xstrata Technology – IsaMill Brochure.

ISAMILL, Rompiendo los límites (IsaMill Brochure ES).

MAUTINO, Marco. Mejoras metalúrgicas con nuevos sistemas de molienda y clasificación 2010.

GAMARRA. Los Queñuales S.A. 2011 – Perú.

DERRICK. Manuales del Stack sizer y HI-G Dryer.

HEINS, Russell; SPARGO, Rubin. “Successful Application of the Inline Pressure Jig”. En: SAIMM Gravity Conference: January 2003, South Africa.

SALAS A.; HINOJOSA O. Experimentación metalúrgica de gravimetría centrífuga con menas de San Florencio- Proyecto P-4/05, 2007.

SALAS A.; HINOJOSA O. Experimentación metalúrgica de gravimetría centrífuga con muestras estañíferas procedentes de las Colas de Caracoles, empleando el Jig Kelsey. Junio 2007.

LONG, William. “Altair Leases Centrifugal Jig to BHP”. En: Minerals International Business Wire, 1997 Oct.

Campbell Centrifugal Jig Montana. College of Mineral Science & Technology

USA Patent Centrifugal Jig Pulsing System 4,998,986 Thomas P. Campbell Mar. 12, 1991.

BOUSO Juan Luis. “Las espirales de concentración y su vuelta a la actualidad”. En: XXIV Convención de Ingenieros de Minas Perú, Spbre 1999.

SADOWSKI, Jim. “Optimising Spiral separations”. Industrie Minerals Outotec. USA October 2007.

Roche MT Workshop. 4-7 Nov. 2002