



**UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA INDUSTRIAL**

**DIAGNOSTICO Y ANÁLISIS ESTRATÉGICO  
DEL NEGOCIO EQUIPOS DE FLOTACIÓN**

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

**RODRIGO ANDRÉS NÚÑEZ RUIZ**

**PROFESOR GUÍA:  
JUAN PABLO ZANLUNGO MATSUHIRO**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
IVAN BRAGA CALDERON  
LUIS ZAVIEZO SCHWARTZMAN**

**SANTIAGO DE CHILE  
OCTUBRE 2014**

## RESUMEN

La flotación es el proceso industrial más importante utilizado en concentración de minerales el mundo. Esta tecnología de un siglo ha alcanzado un alto grado de madurez tanto en su aplicación como en el desarrollo y comercialización de equipos. El mercado en Chile y Perú son un ejemplo de lo anterior, pero también son una oportunidad para participar a través del desarrollo de la cartera de proyectos existente para la próxima década.

Metso es un proveedor mundial de servicios y tecnologías para procesamiento de minerales, que cuenta con la capacidad y experiencia en el ámbito de flotación, pero que no ha establecido una participación relevante en la región, que ha sido entonces dominada por otros proveedores.

Se analiza la oferta de Metso en relación con sus competidores, identificando tanto ventajas como desventajas y se propone como debe modificarse la oferta para lograr diferenciarse y posicionarse durante la próxima década.

El costo de adquisición de equipos de flotación, que representa alrededor del 1 % de la inversión total de un megaproyecto minero, es comparativamente irrelevante frente a la correcta elección y operación de éstos, que si se realizan de forma óptima permiten obtener beneficios notables por mejor rendimiento, con lo cual se puede recuperar el valor de los equipos durante el primer año de operación. Los equipos Metso pueden entregar esta ventaja, sin embargo, su mayor consumo de energía resta alrededor del 10 % de este beneficio, que resulta en definitiva más evidente de demostrar y evaluar durante los estudios de ingeniería.

Competir con precios ajustados es entonces imperativo para introducir la tecnología y permitir demostrar su mejor rendimiento. Mejorar la cadena de suministro, asociarse con proveedores de menor costo y mejorar los diseños son actividades claves. También incorporar tecnologías de punta para control y monitoreo remoto son una ventaja que la diferencia de competidores.

Los recursos clave para tomar esta oportunidad del mercado regional son mantener un staff de especialistas dedicados, que sustentan la difusión y comunicación con clientes desde etapas iniciales de proyectos hasta la post venta.

Las ventas esperadas potenciales son desde 220 hasta 400 millones de dólares durante la próxima década, que marginando un 10 % rentabilizan el costo de actividades y recursos claves, estimados en 460 mil dólares anuales.

## Tabla de Contenido

1	INTRODUCCIÓN .....	4
2	TECNOLOGÍA DE FLOTACIÓN .....	5
2.1	Principios de la Flotación.....	5
2.2	Plantas de Flotación .....	8
2.3	Equipos de Flotación .....	9
2.3.1	Celdas mecánicas .....	10
2.3.2	Columnas de Flotación.....	14
2.3.3	Celdas Neumáticas .....	20
3	MERCADO DE EQUIPOS DE FLOTACIÓN.....	23
3.1	Proyectos en Chile y Perú.....	26
4	REVISIÓN DE LA POSICIÓN DE METSO EN EL MERCADO DE EQUIPOS DE FLOTACIÓN.....	30
4.1	Evolución de Equipos de Flotación Metso .....	30
4.2	Propuesta de Valor Actual Equipos de Flotación Metso.....	36
4.2.1	Celdas Mecánicas RCS .....	36
4.2.2	Columnas de Flotación .....	38
4.2.3	Proyectos EPC o EPS.....	41
4.2.4	Puesta en marcha.....	42
4.2.5	Servicios y repuestos.....	43
4.3	Costo de propiedad de equipos de flotación .....	43
4.4	Curvas de Valor de Oferta Equipos de Flotación.....	48
4.4.1	Celdas mecánicas .....	48
4.4.2	Columnas.....	51
5	ESTRATEGIA PARA LA INTRODUCCIÓN AL MERCADO CHILENO Y PERUANO .....	54
5.1	Curvas de Valor propuesta celdas mecánicas .....	58
5.2	Curvas de Valor propuesta Columnas de Flotación .....	60
6	Actividades Clave a Desarrollar .....	61
6.1	Reducción de Costos de Fabricación y suministro .....	61
6.1.1	Mejoramiento diseño de celdas.....	62
6.1.2	Desarrollo y selección de proveedores de componentes claves y equipos auxiliares.....	62
6.1.3	Identificación de maestranzas certificadas de menor costo.....	63

6.2	Servicio .....	65
6.3	Validación de Tecnologías de Flotación Metso .....	65
6.4	Difusión y Promoción .....	66
6.5	Desarrollo de Herramienta de simulación .....	66
6.6	Mejoramiento o desarrollo de nuevos productos .....	67
6.7	Recursos Claves .....	67
6.8	Restricciones de la compañía para implementar estrategia.....	68
6.9	Recursos y costo esperados .....	69
6.10	Resultados esperados .....	70
CONCLUSIÓN .....		73
Bibliografía .....		76

## **1 INTRODUCCIÓN**

Las rocas de la corteza terrestre son la fuente principal de los metales con valor económico utilizados para el desarrollo de nuestra civilización. Estos elementos se encuentran como minerales de diferentes formas cristalinas, formando compuestos en combinación con otros elementos, pero en concentraciones insuficientes para alcanzar valor comercial.

Para capturar el valor de los minerales finamente diseminados en yacimientos, estos deben extraerse para ser sometidos a un tratamiento en el cual se busca concentrarlos hasta obtener productos comercialmente valiosos, para posteriormente refinarlos hasta obtener un material de utilidad comercial o ingenieril. Entre los métodos existentes de concentración mecánica de minerales, la flotación es el proceso más importante utilizado en el mundo.

El desarrollo de la flotación se produjo a fines del siglo XIX; las primeras patentes de procesos similares a la flotación conocida actualmente, datan de 1904 (E. Elmore) y 1905 (E. Sulman). Paralelamente al desarrollo del proceso y equipos, se trabajaba intensamente en el desarrollo de reactivos para el proceso.

Chile ha sido pionero en el desarrollo de flotación de cobre, desde los primeros años de El Teniente, luego en Potrerillos (1927) y Chuquicamata (1952), se incorporaron las tecnologías más avanzadas disponibles.

Actualmente en la región, compuesta principalmente por Chile, Perú, Argentina y Bolivia se produce alrededor del 50 % del cobre mundial, más cantidades significativas de otros metales como zinc, plomo y molibdeno, todos ellos mayoritariamente a través del proceso de flotación.

Las plantas de procesamiento de mineral cuentan con equipos de flotación de diferentes procedencias, principalmente de proveedores como FLSmidth y Outotec, donde Metso alcanza una participación histórica escasa. Sin embargo, el crecimiento sostenido de la industria minera proyectada para la próxima década, sumado a las crecientes exigencias y dificultades a que debe enfrentarse esta industria, plantean a los proveedores de equipos el desafío de proponer a la industria una oferta atractiva para el cumplimiento de sus objetivos y acorde a sus necesidades.

En el presente estudio se realiza un análisis del mercado regional de equipos de flotación, se revisa la posición de Metso en este mercado, y se plantean acciones estratégicas para obtener una cuota de mercado durante la próxima década.

## 2 TECNOLOGÍA DE FLOTACIÓN

### 2.1 Principios de la Flotación

Para realizar el proceso de flotación es condición necesaria que el mineral extraído de una mina, se encuentre previamente triturado y molido hasta el tamaño en el cual las partículas de las especies mineralógicas de interés económico se encuentran liberadas del resto del material rocoso, denominado ganga. De esta forma, el mineral molido y mezclado con agua en forma de pulpa, es introducido en equipos de concentración, llamados celdas de flotación, donde es mezclado con burbujas de gas, a las cuales se adhieren las partículas de mineral útil, permitiendo de este modo la separación entre partículas útiles y la ganga. El gas que normalmente se utiliza en el proceso es aire.

La separación de partículas de valor y ganga en una celda de flotación está basada en las propiedades físico-químicas de éstas. Existen especies de minerales que ya sea en forma natural o asistida por medios químicos, repelen el contacto con el agua, es decir que no tienen afinidad por el contacto con ella; a esta propiedad se denomina hidrofobicidad, y es lo que permite que partículas de mineral hidrofóbico se adhieran a las burbujas de aire y son transportadas por estas hasta la superficie de la pulpa para formar espuma mineralizada. Las burbujas que colectan partículas de mineral flotable o hidrofóbico ascienden a la superficie de la pulpa debido a la diferencia de densidad con este medio. Por otra parte, los minerales que poseen afinidad por el contacto con el agua, son mojables y al estar inmersos en un medio acuoso no presentan atracción por adherirse a las burbujas de aire; esta propiedad es propia de minerales hidrofílicos, y les permite permanecer en el medio acuoso durante el proceso de flotación para constituir la cola o relave del proceso.

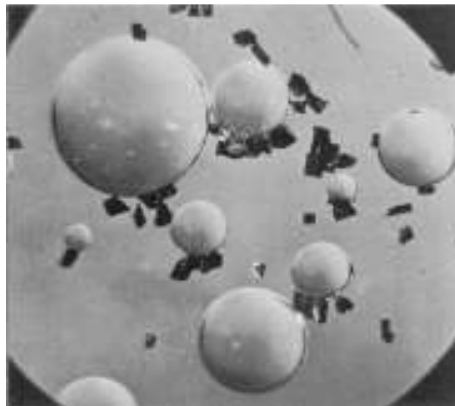


Fig.1 Partículas de galena, mineral de plomo, adheridas a burbujas de aire

Las propiedades físico-químicas de la superficie expuesta de los minerales y del medio acuoso en que se encuentran, son ajustadas mediante la adición de reactivos químicos en la pulpa, que favorecen la selectividad del proceso y mejoran su rendimiento.

El proceso de flotación a nivel industrial se realiza en celdas que operan en forma continua y que constan básicamente de un estanque, en el cual ingresan el gas y la pulpa de alimentación previamente acondicionada con reactivos. El diseño del equipo debe asegurar una mezcla entre burbujas y pulpa para alcanzar la mayor probabilidad de encuentro entre partículas útiles con burbujas, y así facilitar la colección o adhesión partícula-burbuja. Gracias a las propiedades físico-químicas y a la insuflación continua de burbujas de aire, se obtienen dos productos: el concentrado y la cola. El concentrado está constituido por la espuma mineralizada que se forma en la superficie de la pulpa, y es retirada por medios mecánicos o, lo más usual, sale por sí misma al sobrepasar el nivel superior del estanque en el cual ocurre el proceso, mientras que la cola se retira por la parte inferior de la celda, normalmente por gravedad.

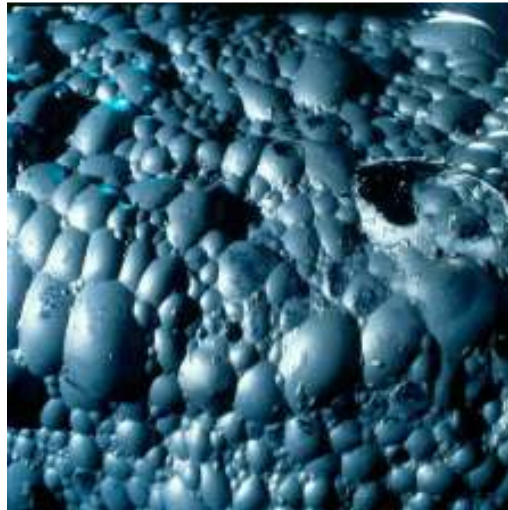


Fig. 2 Espuma mineralizada

Ya que el proceso de flotación tiene una componente probabilística en el fenómeno de adhesión burbuja-partícula y además depende de consideraciones hidrodinámicas, cinéticas y de la condición previa de molienda de los minerales, entre otras, entonces la separación entre mineral útil y ganga no es perfecta. Es decir, para una celda de flotación que tiene capacidad definida, el concentrado obtenido no contiene todo el mineral útil de valor económico que ingresó a la celda, pues parte de él permanece en el medio acuoso durante el proceso, como así también una fracción de la ganga ingresa al concentrado por diferentes mecanismos, contaminando el producto

de interés económico. De esta imperfección en la separabilidad de mineral flotable y ganga se derivan parámetros que caracterizan la eficiencia del proceso de flotación como son la capacidad de enriquecimiento y la recuperación. Estos parámetros se relacionan respectivamente con la calidad o pureza del concentrado para la especie de interés económico, y con la eficiencia en el aprovechamiento de los recursos utilizados. La búsqueda del mejoramiento de estos indicadores de eficiencia es un impulsor del desarrollo de tecnología de flotación, como también lo es el aumento de escala de las operaciones mineras.

El desarrollo de la tecnología de flotación durante un siglo de aplicación industrial, ha permitido por una parte el crecimiento en escala de los equipos, conforme crece la economía y el tamaño de las operaciones de beneficio de minerales, pero también ha impulsado el diseño de diferentes tipos de celdas que, si bien coinciden en el principio básico de aprovechar las propiedades físico-químicas de los minerales para separarlos selectivamente, difieren esencialmente en la forma de contactar los sólidos con el gas y cómo posteriormente se retiran los productos obtenidos, concentrado y cola.

A partir de estos diferentes diseños se han desarrollado equipos especializados en diferentes aplicaciones o que, para una misma aplicación poseen diferentes comportamientos. Es así como diferentes tecnologías de flotación son complementarias entre sí dentro de la industria, como también pueden ser alternativas. El diseño de una planta de flotación de minerales está orientado a obtener un concentrado de alta calidad comercial, al mismo tiempo que se busca minimizar las pérdidas de mineral valioso en las colas. Los principales tipos de celdas de flotación utilizadas en la industria son las celdas mecánicas, las columnas y las celdas neumáticas. Cada una de estas celdas tiene aplicaciones preferentes en las cuales su uso es más conveniente.

La flotación a escala industrial ha evolucionado para satisfacer la demanda de una industria que ha crecido en escala y adopta la tecnología de vanguardia. En general la industria ha visto un constante aumento en capacidad de procesamiento de las plantas, paralelo a una disminución del consumo específico de energía de los equipos. Es así como se ha evolucionado desde celdas de volumen de un metro cúbico, hasta las mayores en uso actual de 300 metros cúbicos. Hace un siglo las plantas de mayor capacidad alcanzaban 3.000 toneladas diarias de procesamiento, mientras las operaciones actuales superan las 200.000 toneladas diarias.

Por otra parte, los diseños de procesos se han simplificado, reduciendo el número de etapas de un circuito de flotación e incorporando instrumentación



y automatización que mejoran la performance de las instalaciones y reducen el empleo de mano de obra especializada en la operación propiamente tal.

Las celdas de flotación en su evolución han adoptado diferentes geometrías, inicialmente cuadradas o rectangulares y más recientemente cilíndricas, de diferente altura y capacidad. En algunos casos se emplea agitación mecánica de la pulpa, y la forma de mezclar la pulpa con aire difiere entre diferentes desarrollos de celdas, según la aplicación en que se desempeña en equipo. .

Las celdas mecánicas utilizan un impulsor y un mecanismo difusor en el interior del tanque para introducir el aire y proporcionar una acción de mezcla.

Las columnas de flotación se caracterizan por la ausencia de agitación mecánica y por su geometría esbelta, donde la mezcla de pulpa con aire se produce por un flujo en contracorriente descendente y ascendente respectivamente. Además se utiliza agua de lavado sobre la espuma para mejorar la calidad del concentrado obtenido.

Estas diferencias de diseño hacen a celdas mecánicas y columnas obtener diferentes rendimientos en cuanto a calidad del producto y eficiencia de recuperación. Su uso a escala industrial siempre consta de combinaciones de ambas tecnologías, que se complementan para obtener un resultado técnico-económico óptimo

La celda neumática se caracteriza por realizar la mezcla de pulpa con aire en un dispositivo externo fijo, y luego la separación de la espuma de concentrado se realiza en tanques de volumen comparativamente pequeño al de celdas mecánicas o columnas. Su aplicación es muy específica y su campo de aplicación es comparativamente reducido en la industria de minerales metálicos.

Por sus características, costo y diseño, las instalaciones industriales de concentración por flotación están constituidas por una combinación de diferentes tipos de celdas, siendo estas complementarias entre sí. Las celdas se conectan entre sí formando circuitos que tienen como objetivo obtener un concentrado de calidad comercial óptima, mientras que en las colas se espera tener el mínimo de mineral útil.

## **2.2 Plantas de Flotación**

La operación de una planta concentradora de minerales por flotación está condicionada entre otros aspectos, por las características geometalúrgicas

del material a beneficiar, la capacidad de molienda, la disponibilidad y calidad de recursos hídricos y otros insumos, que son variables y gestionables en forma continua, pero también depende de los activos físicos disponibles, que son en esencia la dotación de equipos de flotación y equipos auxiliares, su configuración, flexibilidad y adaptabilidad a las variaciones del proceso, que definen la capacidad de una planta de beneficio de mineral, y con esto inciden en la rentabilidad y competitividad de una faena de explotación minera. La operación de concentración de minerales es intensiva en uso de capital fijo, mientras que otros factores productivos son desde el punto de vista económico de importancia relativamente menor.

El diseño y construcción de una planta de flotación es entonces una etapa clave en el éxito de un proyecto de explotación minera. La elección de los equipos adecuados y su correcta disposición en el proceso juegan un rol clave en un proyecto minero. La relación costo/beneficio que resulta del diseño de una planta de flotación incide en la viabilidad de cada proyecto. El desarrollo de la tecnología de flotación ha permitido el aumento del valor de los depósitos minerales en el mundo, que pueden entonces contribuir al suministro de materias primas necesarias para el desarrollo económico y aumento del bienestar en el mundo.

En este contexto de economía globalizada y en expansión, la búsqueda de las mejores tecnologías disponibles en flotación por parte de las compañías mineras y empresas de ingeniería, tanto para el desarrollo de proyectos de plantas nuevas como para el mejoramiento de operaciones existentes, motiva a la industria de suministro de equipos de proceso a competir por ofrecer al mercado las mejores alternativas en costo/beneficio, para equipar las plantas de beneficio, que maximizan el valor del recurso minero existente.

Las empresas proveedoras de equipos entonces deben desarrollar modelos de negocio y estrategias acordes con sus ventajas comparativas, para capturar el máximo excedente del mercado de equipos de proceso.

### **2.3 Equipos de Flotación**

Las celdas de flotación operan con el principio básico de mezclar aire finamente diseminado en burbujas, con la pulpa de mineral a tratar, capturando selectivamente las partículas de mineral que presentan propiedades superficiales adecuadas, para ser separadas del resto a través de una espuma mineralizada que es extraída de la parte superior del equipo. Las propiedades superficiales son modificadas o acentuadas mediante el uso de reactivos químicos, cuya formulación es parte del desarrollo de esta

tecnología. Asimismo, el diseño de los equipos de flotación propiamente tales es un driver en el desarrollo de la tecnología.

De los diferentes tipos de celdas de flotación desarrollados durante un siglo, tres son los principales, siendo dos de ellos los predominantes en la industria: las celdas mecánicas y las columnas, quedando las celdas neumáticas como alternativa sólo para aplicaciones particulares de menor escala.

### **2.3.1 Celdas mecánicas**

Las celdas de flotación a principios del siglo XX poseían volúmenes entre 10 y 100 pies cúbicos (0,3 a 3 metros cúbicos); las instalaciones industriales se caracterizaban por el empleo de extensos bancos de celdas en serie y en paralelo, para cubrir las capacidades de procesamiento requeridas. Denver fue pionera con las celdas Sub-A (sub-aireadas) que se caracterizaban por ser capaces de aspirar aire por sí mismas, utilizando parte de la energía que el motor eléctrico entrega principalmente para la agitación de pulpa y mezcla con aire, sin necesidad de un medio externo que lo introduzca. También fueron comunes en el mercado las celdas Agitair (Galigher) y Wemco (Envirotek).

Durante la década de 1960 se comienza a avanzar en celdas de mayor volumen, alcanzando 500 pies cúbicos, Denver y Agitair fueron los principales proveedores para la industria. En 1975 se introducen a la industria equipos de 1000 pies cúbicos. En la década de 1980 Denver desarrolla los equipos cell-to-cell como una evolución de la tecnología Sub-A.

Al crecer el volumen de los equipos, éstos perdieron gradualmente su capacidad de autoinsuflar el aire requerido por el proceso. Se introducen entonces las celdas con aire forzado, es decir, que requieren un soplador externo auxiliar para asegurar la cantidad de aire que optimiza el proceso. Denver introduce las celdas DR (Direct Recirculation) que además es capaz de procesar mineral con menor grado de molienda sin sufrir la sedimentación de éste en el fondo de los estanques.

En todos estos casos la geometría de los tanques utilizados era cuadrada o rectangular. En la década de 1990 se introducen celdas con mayor volumen (4500 pies cúbicos) y geometría cilíndrica, que permitió mejorar características de la operación en cuanto al comportamiento hidrodinámico y performance, en particular la selectividad. Desde entonces también deja de usarse el pie cúbico como medida de referencia más común, pasando a ser el metro cúbico una unidad más común para designar la capacidad de los

equipos. El aumento de volumen de equipos disponibles ha sido de 20 veces desde los años 80 hasta el presente.

#### Ventajas del Crecimiento en escala de celdas

- Reducción consumo de energía específico por unidad de volumen
- Reducción área de construcción (footprint)
- Reducción costo equipo por unidad de volumen
- Mejor automatización debido al menor número de instrumentos y controles requeridos

Estas características han impulsado el crecimiento en escala de equipos, obteniendo así menores costos de inversión y de operación, simplificando los diseños de plantas con un menor número de equipos para una capacidad definida, y permitiendo una operación más simple con menor requerimiento de personal para operaciones y mantenimiento.



Fig. 3 Celda mecánica cilíndrica

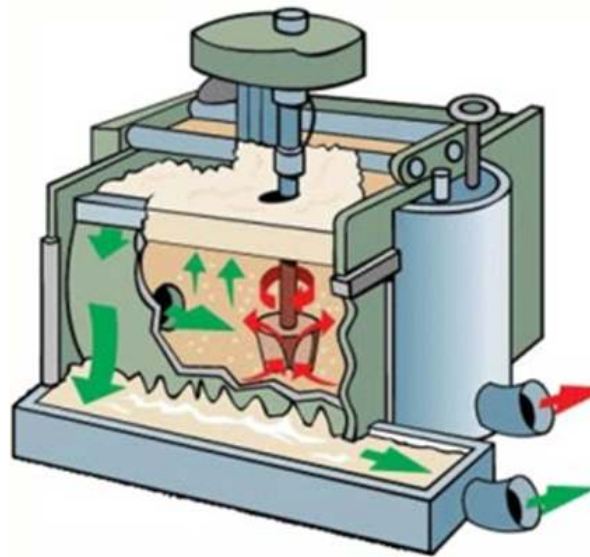


Fig. 4 Celda mecánica con tanque rectangular

Diversos actores han sido parte de la oferta de celdas de flotación durante las últimas décadas. Entre ellas se destacan las siguientes:

Metso. Tecnologías Denver y Sala.

- RCS (Reactor Cell System): Celdas aire forzado desde 0,8 hasta 300 m<sup>3</sup>
- Celdas Denver DR hasta 1500 pies cúbicos. Aplicación principalmente en minerales de molienda gruesa tales como potasio

FLSmidth. Reúne tecnologías Wemco y Dorr Oliver, anteriormente competidoras.

- Wemco 1+1. Celdas con estanque rectangular hasta 3000 pie<sup>3</sup>.
- Wemco Smartcell: celdas cilíndricas tipo autoaspirante hasta 257 m<sup>3</sup>
- Dorr Oliver: celdas con mecanismo tipo aire forzado hasta 350 m<sup>3</sup>
- Supercell. Celdas con estanque estándar hasta 300 o 350 m<sup>3</sup>, donde se puede instalar un mecanismo tipo autoaspirante (Wemco) o tipo aire forzado (Dorr Oliver). Actualmente en desarrollo Supercell 600-660 m<sup>3</sup>

Outotec, anteriormente denominada Outokumpu,

- TankCell aire forzado hasta 300 m<sup>3</sup>. En desarrollo Tankcell 500 m<sup>3</sup>

Tenova. Tecnología desarrollada por Bateman, adquirida por Delkor en 2008 y luego por Tenova.

- Celdas BQR Delkor aire forzado con volumen hasta 150 m<sup>3</sup>

BGRIMM. Beijing General Research Institute of Mining and Metallurgy.

- Celdas aire forzado con volumen hasta 300 m<sup>3</sup>

Aker Sin Actividad actual

Agitair. Sin actividad actual

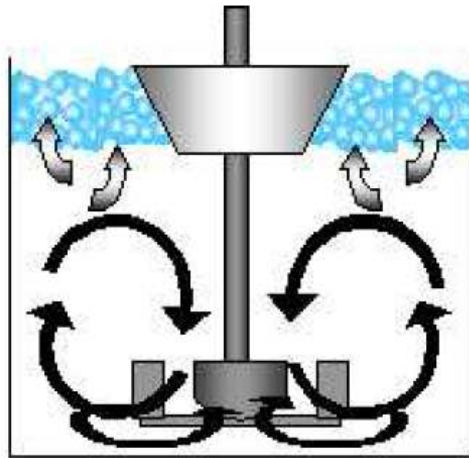


Fig.5 Esquema celda tipo aire forzado

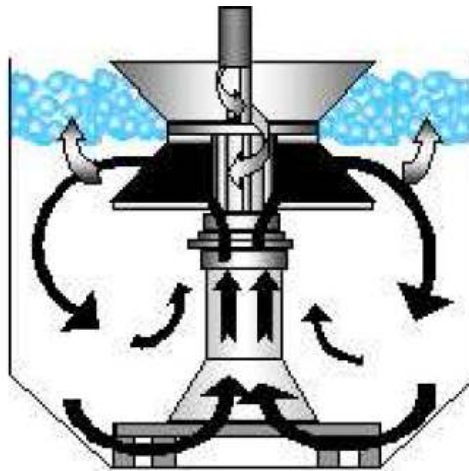


Fig.6 Esquema celda tipo autoaspirante

Junto con el aumento en escala de los equipos, otros aspectos incorporados a los diseños son:

- Incorporación de controles de nivel independientes por cada celda, cuando estas son mayores a 200 m<sup>3</sup>, esto es posible por el menor número de equipos que resulta de su crecimiento en escala.

- Reducción e incluso eliminación del número y tamaño de cajones de traspaso entre celdas, que permite reducir el área de instalación y los costos de fabricación y montaje.
- Sustitución de la transmisión de potencia a través de poleas por cajas reductoras. Tendencia explicada por el aumento de potencia instalada por equipo por sobre los 250 hp.
- Incorporación de canaletas recolectoras interiores, radiales o transversales, para compensar la pérdida relativa de capacidad de rebose cuando crecen los equipos en volumen.
- Automatización de control de flujo de aire independiente por cada celda, válido para celdas con aire forzado.
- Incorporación de sistemas de visualización de espuma en cada celda y medición en línea de leyes de productos principales, asociado con sistemas de control avanzado.

### **2.3.2 Columnas de Flotación.**

La columna de flotación, que puede ser considerada una celda neumática de flujo contracorriente, fue desarrollada en Canadá durante la década de 1960 inicialmente para aplicaciones en carbón y hierro. Luego de probar su eficacia en circuitos de flotación de molibdeno, se introdujo definitivamente en la industria del cobre durante la década de 1980.

Por sus características, la columna se emplea en etapas de limpieza, es decir, para la obtención de los productos finales, que requieren un alto estándar de calidad. Una planta de flotación actual es una combinación de celdas mecánicas en etapas de flotación primaria, barrido y eventualmente en primera limpieza, con columnas en etapa de primera y/o segunda limpieza. Normalmente una etapa de flotación en columnas reemplaza a más de una etapa de flotación en celdas mecánicas de los antiguos diseños existentes en la industria, simplificando así los circuitos y diseños de proceso. El complemento de celdas mecánicas y columnas permite optimizar los costos de inversión, operación y el comportamiento metalúrgico del conjunto.

Minera Escondida fue el primer proyecto en Chile y pionero en el mundo, que contempló columnas desde su inicio en 1990 y desde entonces todos los proyectos de flotación de cobre, a excepción de Carmen de Andacollo (Teck) las han incluido en sus diseños.

Además del cobre, las columnas en combinación con celdas mecánicas son un equipo estándar para flotación de molibdeno, zinc y plomo.

La evolución de la flotación columnar ha tenido los siguientes ejes principales:

a) Sistema de inyección de gas:

La inyección de gas se considera habitualmente como el elemento más relevante y distintivo de una columna. En general se clasifican en internos y externos,

- burbujeador de medio poroso (internos): empleados en los comienzos, donde las burbujas se formaban al traspasar un elemento tal como tela filtrante o material cerámico. Este sistema ya en desuso tenía dificultades para la mantenibilidad (obstrucción) y entregaba una performance limitada pues no generaba burbujas de tamaño óptimo.
- Lanzas perforadas (internos). El aire, habitualmente mezclado con agua, se inyecta en tubos con una serie de perforaciones a través de las cuales el aire sale formando burbujas en el interior del tanque. Ya no es común encontrarlos en la industria debido a la mantenibilidad (desgaste) y reducida flexibilidad operacional.
- Lanzas de abertura fija (internos). Consisten en un tubo con una única salida en su extremo, que posee una reducción de diámetro para aumentar la velocidad del aire y con esto favorecer la formación de burbujas más pequeñas.
- Lanzas de abertura variable (internos). Al diseño anterior se agrega una cabeza ajustable desde el exterior para mejorar el control del tamaño de burbuja obtenido. Junto con las lanzas de abertura fija son las más comunes en la industria debido a su costo de inversión contenido, sin embargo su performance adolece de ineficiencia al generar no sólo burbujas finas sino también una proporción de mayor diámetro.
- Mezclador estático Microcel. (externo). El aire se mezcla con pulpa recirculada desde la zona inferior de colas mediante una bomba centrífuga, en un dispositivo externo donde fuerzas de cizalle lo dispersan en finas burbujas en un rango de tamaños acotado y óptimo para el proceso, entre 1 y 2 milímetros mayormente. La mezcla de pulpa con burbujas se introduce al tanque.
- Tubo de cavitación (externo). Es una variación del sistema de mezclador estático, en que la mezcla de pulpa-aire pasa a través de una restricción de diámetro a alta velocidad; la cavitación de la mezcla genera burbujas en un rango de tamaño fino y ultra fino. Conceptualmente las burbujas subdimensionadas son inútiles pues carecen de la capacidad de adherirse a partículas que son de mayor tamaño y son arrastradas hacia las colas, generando ineficiencia energética y de performance.



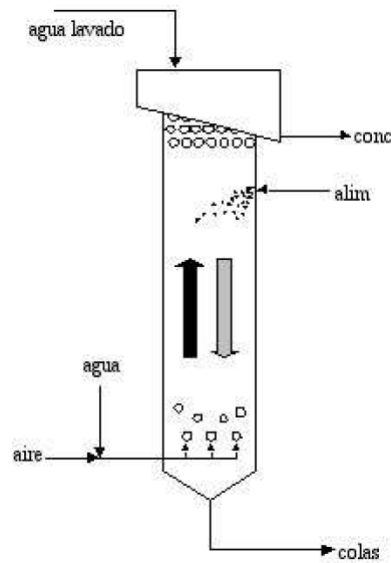


Fig. 7 Columna con inyección de aire interna

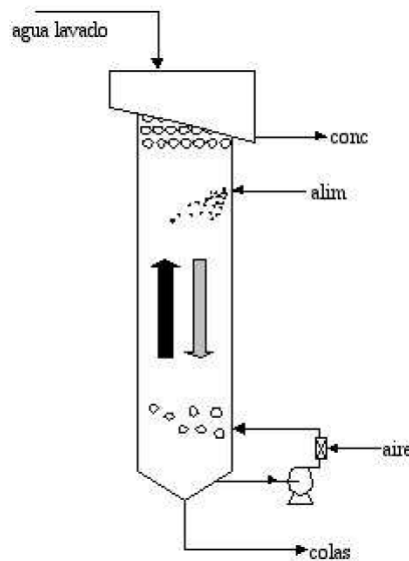


Fig. 8 Columna con inyección de aire externa

## b) Geometría y diseño estructural

Las columnas en general se caracterizan por su estanco de altura variable entre 10 y 15 metros, y sección transversal desde 0,5 m<sup>2</sup> hasta 28 m<sup>2</sup> dependiendo de cada aplicación. Las dimensiones de las columnas no son fijas y se ajustan a cada diseño en particular.

El empleo de divisores internos en columnas de más de 5 m<sup>2</sup> de sección transversal ha sido habitual desde la década de 1980. Estos divisores

dispuestos en dirección vertical se conciben para crear internamente compartimientos separados normalmente de un metro cuadrado, que favorecerían el comportamiento hidrodinámico del equipo. Sin embargo la reducción de costos de fabricación, y la compensación con mejores sistemas de inyección de aire, sumado a diseño de circuitos con etapas compensatorias de la eventual pérdida de eficiencia metalúrgica, han llevado a la eliminación de estos divisores.

Por otra parte, la geometría de los tanques en equipos de tamaño medio y grande ha dejado de ser cuadrada o rectangular, pues esta geometría obliga a compensar la deficiencia estructural con más refuerzo exterior, resultando en equipos de incluso el doble de peso que su equivalente en geometría cilíndrica.

En resumen, la tendencia de la industria ha sido hacia la supresión de divisores internos y los diseños consideran solamente estanques cilíndricos. La altura y diámetros son especificados y fabricados para cada requerimiento.

En cuanto a los materiales, el estándar es el acero al carbono, con revestimientos de pintura o goma, dependiendo de la aplicación y condiciones de corrosión de cada caso.

El uso de agua de lavado es un estándar en columnas, y es junto con el empleo de espumas de mayor profundidad, la principal explicación de la alta selectividad que caracteriza a estos equipos en comparación con celdas mecánicas. El goteo o lluvia de agua sobre la espuma mineralizada se puede aplicar mediante un conjunto de cañerías perforadas que la distribuyen sobre la superficie, o bien mediante una bandeja perforada que cumple la misma función. El empleo de cañerías perforadas no es recomendable si no se asegura el suministro de agua sin impurezas que causen una rápida obstrucción, y obligue a un mayor trabajo de mantenimiento



Fig. 9 Columna de geometría rectangular e inyección de aire mediante lanzas.

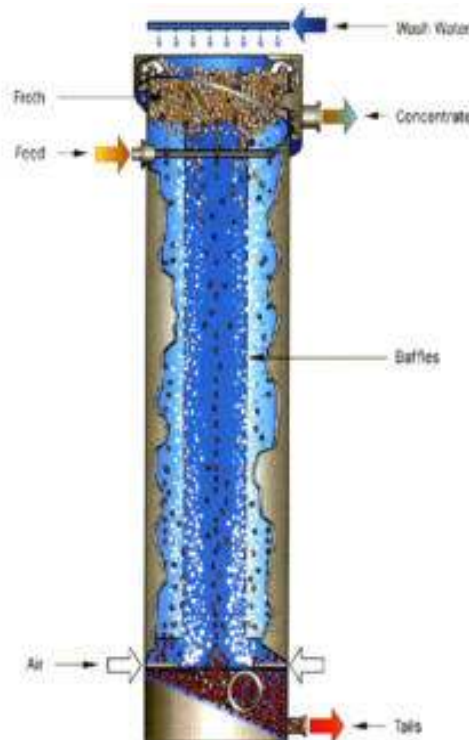


Fig. 10 Columna de geometría cilíndrica con divisores internos e inyección de aire mediante lanzas.



Fig. 11 Columna de geometría cilíndrica sin divisores internos y con sistema de inyección de aire externo.

c) Instrumentación y control.

Las columnas se han beneficiado de las mejoras en instrumentación y control desarrolladas por la industria. Cada equipo posee como estándar tres lazos de control:

- Flujo de Aire
- Flujo agua de lavado
- Control nivel de interfase pulpa/espuma (profundidad de espuma)

Para implementar estos controles, durante los 80 y 90 se empleaban normalmente controladores locales tipo PLC. Posteriormente esta tarea ha sido sustituida por la programación en los sistemas de control distribuido (DCS) de las plantas.

Por otra parte, la reducción de costos y la experiencia en operaciones han llevado a prescindir de otros ítems de inversión y mantenimiento tales como la medición de flujo de alimentación y colas, medición y control de flujo de agua para la mezcla con aire (ya no se utiliza en las plantas). En vez de éstos, la incorporación de sistemas de visualización de la espuma y medición de leyes en línea, unido con la implementación de estrategias de control experto o control avanzado, han aportado mejoras en estabilización y optimización de las operaciones.

Durante casi tres décadas de uso de columnas como estándar en circuitos de flotación de metales no ferrosos, la industria ha adoptado los cambios mencionados, siendo los principales proveedores de equipos:

Metso. Con la incorporación de CISA desde el año 2000, empresa francesa derivada de Control International Inc. fundada en Estados Unidos en la década de 1980, Metso comercializa columnas con tecnología de inyección externa de aire, Microcel.

Eriez. Esta compañía dedicada a equipos magnéticos adquirió a CPT (Canadian Process Technology), a su vez heredera del conocimiento en columnas desarrollado por Cominco antes de 1990. Comercializa equipos con inyección de aire externo a través de tubos de cavitación, o con inyectores internos de abertura fija, Slamjet.

SGS. Esta compañía adquirió a Minnovex, empresa canadiense con conocimiento en flotación columnar, desarrollo y comercialización de inyectores internos de abertura variable, que es su principal actividad en el mercado.

FLSmidth. Durante la década de 1990 desarrolló las columnas denominadas Pyramid, actividad que abandonó. En su reemplazo, durante algunos años complementó su oferta de celdas mecánicas con columnas adquiridas a CPT, lo que cesó cuando esta última fue adquirida por Eriez.

MolyCop. Proveedor local de columnas, con actividad sólo en Chile, pero cuyo giro principal es la comercialización de medios de molienda (bolas de acero) para operación de plantas de molienda. Provee inyectores internos de abertura fija. No ha adoptado como estándar la geometría cilíndrica de estanques ni la eliminación de divisores internos.

### **2.3.3 Celdas Neumáticas**

Las celdas neumáticas co-corriente o celda de contacto, son equipos donde la mezcla de pulpa de alimentación con aire se realiza en forma intensa a través de un tubo descendente llamado downcomer, durante un tiempo reducido de sólo algunos segundos, con alta concentración de gas en contacto con la pulpa mineralizada. La mezcla entonces ingresa a un tanque de volumen proporcionalmente reducido comparado con las celdas mecánicas o columnas a capacidad de tratamiento equivalente. Este tanque tiene la función de permitir la separación de espuma para ser removida como producto final, normalmente de alta calidad.

La aplicación de este tipo de celdas es principalmente en la industria del carbón, donde muestran ventajas respecto a los diseños con celdas mecánicas y columnas, de mayor tamaño y costo de inversión.

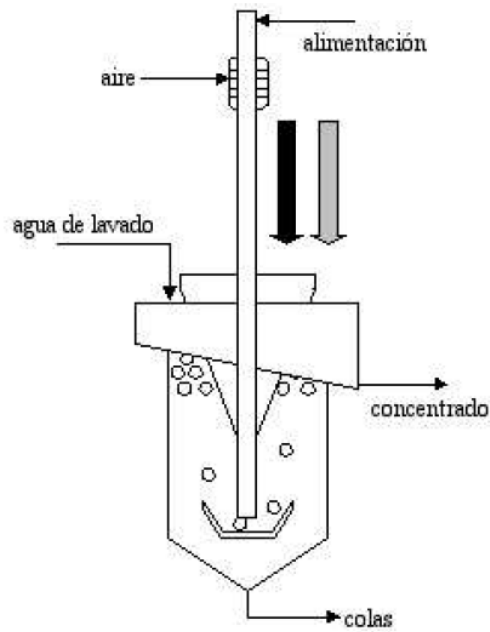


Fig. 12 Esquema de una celda neumática o celda de contacto.

Los principales actores en el mercado son:

Glencore Xstrata Technology. Comercializa la celda Jameson, que fue desarrollada en Australia a partir de 1969, alcanzando aplicaciones industriales exitosas a partir de 1980.

Maelgwyn. Celda G-Cell, comercializada en Chile por Ingeniería de Minerales, corresponde a desarrollo de esta tecnología en Alemania (Imhoflot) anteriormente conocida como celda Ekof.

Siemens. Tecnología desarrollada para aplicar en carbón.

En relación a los diferentes tipos de celdas que han sido desarrolladas durante un siglo, se puede decir que su evolución es lenta y se caracteriza entre otros aspectos por:

- la dificultad para probar nuevos diseños a escala industrial, debido a la interferencia con operaciones continuas que pueden sufrir pérdidas irreversibles en caso de errores.

- Se ha desarrollado numerosas variantes a los diseños originales de celdas de flotación, sin cambiar significativamente los conceptos fundamentales del proceso. El escalamiento y diseño se han enfrentado a la falta de modelos y criterios fundamentales probados que orienten hacia quiebres tecnológicos.
- La industria minera es en general conservadora y toma riesgos muy controladamente, lo que dificulta la innovación en nuevas tecnologías y diseños.
- Los ciclos de desarrollo de proyectos mineros son largos, en promedio de 10 años. Desde el diseño del proceso y selección de equipos principales de flotación hasta su implementación y puesta en marcha se puede contar a lo menos cinco años, durante los cuales no será posible introducir cambios de tecnología o nuevos diseños que estén disponibles para la industria.

### 3 MERCADO DE EQUIPOS DE FLOTACIÓN

La flotación es el proceso principal por el cual se concentran, entre otros, los minerales de cobre, molibdeno, zinc, plomo, hierro, oro y plata.

Las empresas mineras, en cuyas cadenas de procesos productivos se encuentran las plantas de flotación, constituyen el principal mercado de equipos de flotación en la región. La construcción de plantas de flotación como parte de un proyecto greenfield, o ampliaciones y modificaciones de plantas existentes, demanda equipos que deben cumplir las especificaciones de proceso, definidas a través de estudios geo-metalúrgicos y evaluación de alternativas propuestas.

Para comprender la importancia del proceso de flotación dentro de la cadena de producción de una compañía minera, realizamos la siguiente comparación en relación con los otros procesos que le preceden o le suceden. Si se considera un proyecto de construcción de una mina y planta concentradora de cobre promedio de la gran minería chilena o peruana, el costo directo de adquisición de los equipos de flotación propiamente tales puede significar solamente en torno al 1-2 % de la inversión total del proyecto, incluida la mina y toda la planta de procesamiento. Si a lo anterior se suma el costo de equipos auxiliares tales como sopladores de aire y bombas de pulpa, sistemas eléctricos, sistema de dosificación de reactivos, obras civiles, montaje electromecánico, cañerías, instrumentos, sistemas de control e infraestructura, la inversión total en una planta de flotación no supera el 10 % del proyecto total, y es mucho menor a lo requerido para otros procesos como la extracción y transporte del mineral, reducción de tamaño en chancado y molienda y para la posterior disposición de residuos sólidos y líquidos. Sin embargo, pese a que los montos de inversión son comparativamente menores, la flotación es el proceso más importante en términos de valor agregado a los productos comerciales obtenidos de estas operaciones. Mientras en las otras operaciones solamente se realiza el transporte, reducción de tamaño, almacenamiento de materiales o manejo de residuos, es en esta etapa donde se separan materiales estériles de útiles, y se obtienen productos de valor comercial, con la calidad apropiada para su comercialización, que rentabilizan el negocio y justifican las inversiones y riesgo asumidos por la industria minera.

Se puede decir entonces, que la concentración del mineral, particularmente la flotación es, posterior a la exploración geológica y planificación minera, un proceso clave y central en la cadena de valor de la industria minera. La extracción del mineral desde el yacimiento, el chancado y molienda, la logística de transportes y abastecimiento, son actividades que



conceptualmente se pueden considerar como complementarias al proceso fundamental que es separar especies de valor comercial de otras que no lo tienen, creando así un producto que es demandado para satisfacer diversas necesidades de las industrias más diversas en el mundo.

La importancia de la flotación radica entonces en que mientras no exista un quiebre tecnológico que plantee una alternativa técnico-económica competitiva a este proceso, entonces éste seguirá estando presente en los diseños de los proyectos mineros de beneficio de minerales sulfurados, como son los que mayoritariamente componen la cartera de iniciativas a ejecutar durante el próximo decenio en Chile y Perú, principalmente para cobre, como se verá más adelante.

El desarrollo de la industria minera ha llevado a Chile y Perú a concentrar el 45 % de la producción mundial de cobre de mina (16,6 Mt en 2012). Al mismo tiempo, estos dos países poseen el 40 % de las reservas explotables del mundo.

En el caso del molibdeno, Chile y Perú suman 22 % de la producción mundial (265 kt en 2012). Esta producción se obtiene como subproducto de la explotación del cobre, a través de un proceso de flotación selectiva.

El zinc y el plomo no tienen relevancia en la minería chilena, sin embargo son importantes en Perú, que alcanza 11 % de la producción mundial de zinc (12 Mt en 2012) y 8 % de la producción mundial de plomo (10,6 Mt en 2012).

El cobre se presenta en diferentes formas minerales en la naturaleza, principalmente como sulfuros o como óxidos, y dependiendo de ésta su extracción se realiza mediante flotación o por lixiviación respectivamente.

La figura 13 muestra la evolución de la producción de cobre de Chile desde 1992 hasta la fecha, y además se agrega la proyección esperada para la próxima década. Se observa que el cobre producido por medio de flotación (concentrados) en 2012 alcanza a 3,4 millones de toneladas, con un crecimiento de 90 % respecto a la producción de comienzos de los 90. Si bien en 1992 los concentrados representaban el 93 % de la producción de cobre chileno, y esta proporción ha disminuido hasta el 63 % en el presente, esta tendencia se revertirá para alcanzar nuevamente el 82 % durante el próximo decenio debido al agotamiento de recursos lixiviables, que deberán ser sustituidos por explotación de sulfuros para sostener el crecimiento esperado de la producción de cobre chileno.

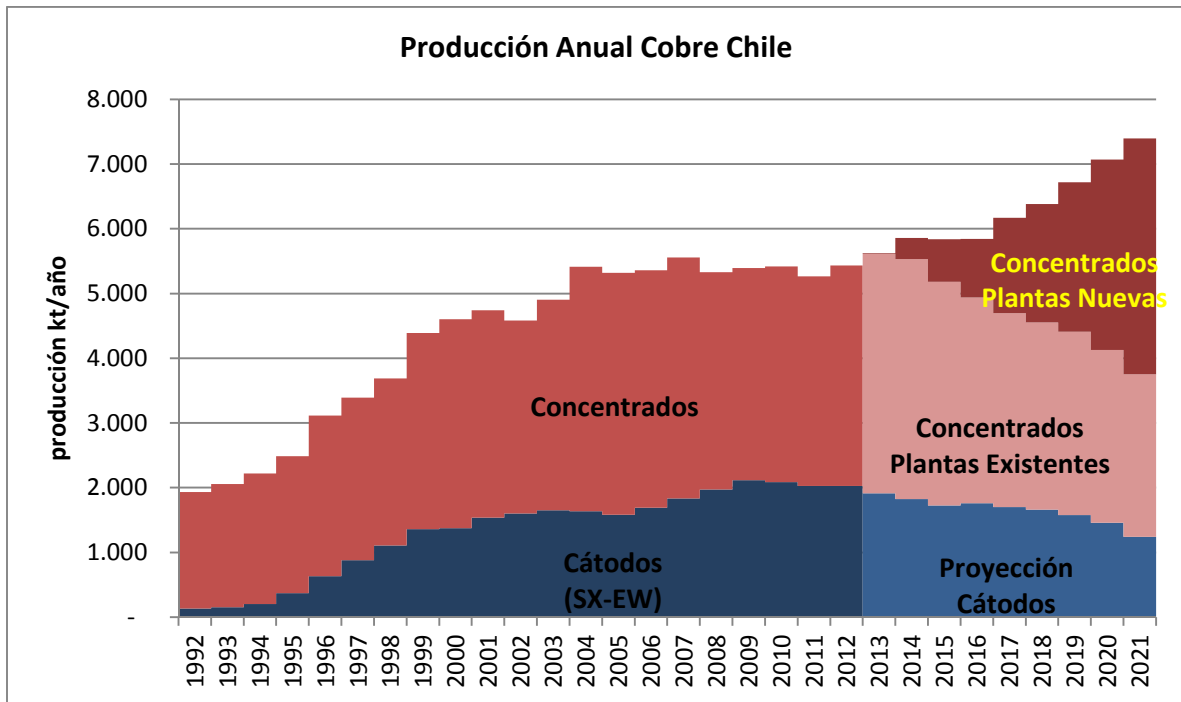


Fig. 13 Producción chilena de cobre histórica y proyectada.

Para alcanzar una producción total de cobre en Chile, de 7,4 millones de toneladas en 2021, se debe compensar la caída de 39 % de la producción por vía hidrometalúrgica de cátodos respecto a 2012. Para esto, la producción de cobre mediante flotación debe aumentar en un 82 % respecto a 2012, para alcanzar las 6,2 millones de toneladas en 2021. Para concretar tal aumento, se deben ejecutar proyectos de nuevas plantas concentradoras, primero para compensar la menor producción de plantas existentes debido a la disminución de leyes de los yacimientos actualmente explotados, y segundo para agregar capacidad adicional. Al ejecutarse los proyectos esperados, la producción de nuevas plantas superará a la de plantas existentes, alcanzando 3,6 millones de toneladas en 2021 (6% más que el producido en 2012). En otras palabras, en una década se debe ejecutar proyectos de nuevas plantas concentradoras con capacidad de producción levemente superior a la existente en 2012.

Por otra parte las futuras plantas de flotación, deberán ser diseñadas para procesar minerales de calidad inferior al procesado por las plantas en 2012, es decir, para alcanzar una producción equivalente de cobre, se debe procesar más mineral. Se estima que si las actuales plantas de flotación procesan en conjunto un total de 450 millones de toneladas anuales de mineral, las nuevas plantas deberán procesar 820 millones de toneladas por año, es decir, un 180 % respecto a la capacidad de 2012. Esta diferencia se explica por la menor calidad de los yacimientos, que al disminuir sus leyes

obliga a compensar mediante el incremento el tratamiento de mineral para mantener la producción final.

La construcción de nuevas plantas concentradoras con una capacidad de tratamiento conjunta de 820 millones de toneladas por año, equivale a casi triplicar la capacidad de procesamiento a 2012.

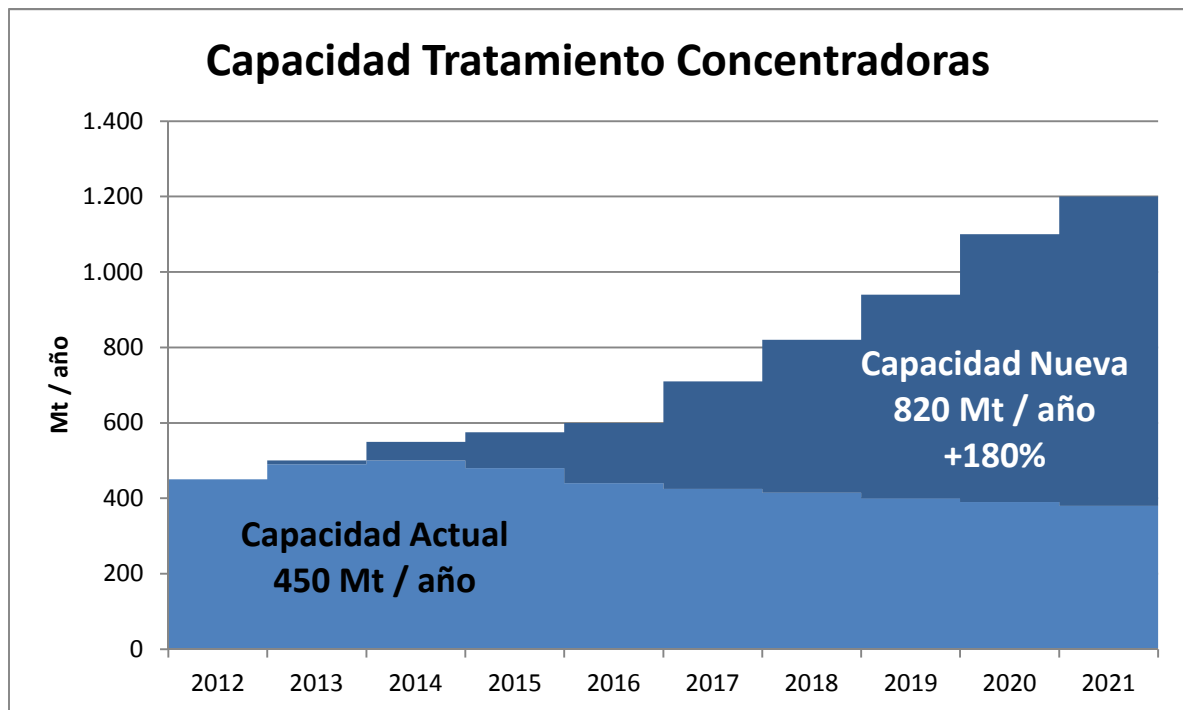


Fig. 14 Capacidad de tratamiento proyectada plantas concentradoras chilenas

Las capacidades de tratamiento de mineral y de producción de cobre en forma de concentrados, permiten dimensionar estimativamente el número y tamaño de equipos a instalar, en particular de celdas mecánicas y columnas, que son los equipos de proceso principales a considerar en las plantas proyectadas.

### 3.1 Proyectos en Chile y Perú.

Para alcanzar la capacidad de producción esperada, diversas empresas mineras desarrollan proyectos greenfield o brownfield basados en su capacidad, experiencia y en los recursos minerales existentes en Chile y Perú. Estas iniciativas se encuentran en diferentes estados de avance, desde estudios de perfil, hasta etapa de construcción, pasando por las diferentes etapas de ingeniería, estudios ambientales, evaluación económica u obtención de permisos.

Considerando la cartera completa de proyectos mineros se alcanza una inversión total estimada de 70.623 millones de dólares en Chile y 60.067 millones de dólares en Perú, cifras comparables y de gran magnitud que ponen de manifiesto la importancia de esta actividad económica en la región.

En el caso de Chile, la inversión esperada que ha sido afectada negativamente por el retraso o cancelación de proyectos debido a diversos factores, principalmente a la incertidumbre y alto costo del suministro de energía demandada por las nuevas operaciones, aumento de los costos en general, disponibilidad de recurso humano calificado y presiones sociales y ambientales. El mejoramiento de la situación de suministro de energía y de los procesos de evaluación ambiental de proyectos podría reactivar iniciativas actualmente detenidas, para recuperar un potencial superior incluso a 100 mil millones de dólares.

Tabla 1. Inversión proyectada en plantas de beneficio de mineral (miles USD)

	Chile	Peru
Estudio de perfil	18.783	21.943
Ingeniería preliminar	3	800
Análisis Energía	600	
Análisis del Mercado	650	100
Revisión del dueño	250	3.580
Estudio de sitio	200	80
Permisos	6.428	4.638
Evaluación Económica	22.760	6.249
Aprobación de Capital		180
Diseño detallado		568
Ingeniería de detalles	116	
Adquisiciones		1.452
Preparación de sitio		4.800
Construcción	20.793	15.143
Montaje Estructural	40	534
<b>Total</b>	<b>70.623</b>	<b>60.067</b>
<b>En etapa preinversional</b>	<b>49.674</b>	<b>37.570</b>

La minería peruana ha sido igualmente afectada por la cancelación o postergación de proyectos. Perú cuenta con una ventaja comparativa respecto a Chile en cuanto al precio y disponibilidad futura de suministro eléctrico para abastecer la demanda esperada, sin embargo en este caso la importancia de las presiones sociales ha sido más significativa que en Chile.

Existe un factor común a todas las economías con vocación exportadora de commodities como cobre o zinc, que es la menor tasa de crecimiento de la economía china. Durante más de tres décadas la economía china creció a tasas incluso superiores al 10 %, causando esto un crecimiento sin precedentes en la demanda de materias primas tales como cobre o acero, sin embargo la reducción a tasas cercanas a 7 % del crecimiento chino han reducido las expectativas de crecimiento de demanda de materias primas. Este ha sido un factor que ha contribuido a la postergación de proyectos.

Las tablas siguientes detallan los principales proyectos en etapa de evaluación económica, estudio de perfil u obtención de permisos, que consideran plantas de flotación en sus procesos:

Tabla 2. Principales proyectos en etapa pre inversional en Chile

<b>Proyecto</b>	<b>Inversión (kUSD)</b>	<b>Dueño</b>	<b>Etapas</b>
Mantoverde Sulfuros	600	Anglo American	Eval Económica
Volcan	800	Andina Minerals	Eval Económica
Planta Molibdeno Esperanza	120	AMSA	Eval Económica
Radomiro Tomic II	2500	Codelco	Eval Económica
El Abra sulfuros	4000	Freeport	Eval Económica
Sulfuros Encuentro Esperanza	3500	AMSA	Eval Económica
Esperanza Sur Telegrafo	3500	AMSA	Eval Económica
Caspiche	3500	Eton	Eval Económica
Santo Domingo	600	Santo Domingo/Capstone	Eval Económica
Relincho	3000	Teck	Eval Económica
Expansión Collahuasi	6500	Anglo American/Glencore	Perfil
Expansión Los Pelambres	7000	AMSA	Perfil
Expansión Sierra Gorda	818	KGHM / Sumitomo	Perfil
Dominga	600	Andes Iron	Perfil
Productora	700	Hot Chili Ltd	Perfil
Lomas Bayas Sulfuros	1200	Glencore	Perfil
El Espino	600	Pucobre	Perfil
Expansion Andina 244	3200	Codelco	Permisos
Quebrada Blanca fase 2	2000	Teck	Permisos
Lobo Marte	500	Kinross	Permisos

Tabla 3. Principales proyectos en etapa pre inversional en Perú

<b>Proyecto</b>	<b>Inversión (kUSD)</b>	<b>Dueño</b>	<b>Etapa</b>
Pampa de Pongo	3300	Jinzhao	Eval Económica
El Galeno	2000	Lumina Copper	Eval Económica
Chaquicocha	400	Yanacocha	Eval Económica
Quellaveco	3500	Anglo American	Revisión Dueño
Michiquillay	700	Anglo American	Permisos
Corani	574	Bear Creek	Permisos
Magistral	650	Milpo	Permisos
Pukaqaqa	629	Milpo	Permisos
Expansion Toquepala	1000	Southern Peru	Permisos
Cuzco	1000	Apurimac Ferrum	Ing Perfil
Cañariaco Norte	1599	Candente Copper	Ing Perfil
Chucapaca	1200	Canteras del Hallazgo	Ing Perfil
Cerro Ccopane	1000	Cuervo Resources	Ing Perfil
Coroccohuayco	500	Glencore	Ing Perfil
Zafranal	1245	AQM Copper	Ing Perfil
Los Calatos	1339	Hampton Peru	Ing Perfil
Cotabambas	900	Panoro Apurimac	Ing Perfil
La Granja	3000	Rio Tinto Peru	Ing Perfil
Los Chancas	1560	Southern Peru	Ing Perfil
Apurimac	2894	Strike Resources	Ing Perfil
Tantahuatay	500	Buenaventura	Ing Perfil
Expansion Toromocho	1320	Chinalco Peru	Adquisiciones

De las tablas 2 y 3 se deduce que existe un potencial de 45 mil y 30 mil millones de dólares de inversión en Chile y Perú respectivamente. Estas inversiones necesariamente incluyen equipos de flotación en todos los casos.

A partir de esta proyección, se plantea para los proveedores de estos equipos el desafío de obtener una participación de mercado, basado en sus ventajas tales como tecnología disponible, experticia, conocimiento del negocio, con los cuales se definirá el modelo de negocio a implementar.

## 4 REVISIÓN DE LA POSICIÓN DE METSO EN EL MERCADO DE EQUIPOS DE FLOTACIÓN

### 4.1 Evolución de Equipos de Flotación Metso

Metso, compañía multinacional con sede en Finlandia, cuenta con la experiencia y conocimiento de reconocidas marcas en procesamiento de minerales: en el ámbito de equipos de flotación están Denver (Estados Unidos), Svedala (Suecia), Sala (Suecia) y Cisa (Francia), marcas que pertenecen a Metso.

Bajo el alero de Denver se han desarrollado dos tipos de celdas de flotación:

- Denver Sub-A
- Denver DR

Denver Sub-A. Corresponde a los primeros desarrollos de celdas, que se caracterizaban por poseer un sistema de auto aspiración de aire, y volumen hasta 400 pies cúbicos (11 metros cúbicos). Al verse la industria ante la necesidad de crecer en capacidad de equipos, esta celda se vio limitada por su sistema de aire autoaspirado, dando paso al desarrollo de celdas con aire forzado. Actualmente ya no se comercializan estas celdas.

Denver DR. Se caracterizan por su sistema de recirculación interna de pulpa ("Direct Recirculation") y la incorporación de aire forzado proveniente de un soplador. Son especialmente hábiles para flotar minerales con bajo grado de molienda. Su principal campo de aplicación es en la flotación de potasio y su capacidad alcanza hasta 500 pies cúbicos (14,3 metros cúbicos).

Tabla 4. Celdas de Flotación Denver DR

	Volumen (m3)	Motor (kW)	Aire (Am3/min)
DR 15	0,34	2,2	0,4
DR 18Sp	0,71	4	0,7
DR 24	1,42	5,5	1,3
DR 100	2,83	11	2,3
DR 180	5,10	15	3,1
DR 300	8,50	22	4,5
DR 500	14,16	30	6,5

Por otra parte bajo la marca Svedala y luego Metso ha evolucionado la celda de flotación de aplicación más genérica, caracterizada por diseño de tanques cilíndricos y el empleo de aire forzado, que permiten un mejor comportamiento hidrodinámico, mayor eficiencia energética y mejor control de flujo de aire. Se trata de la celda RCS (Reactor Cell System), que alcanza capacidades desde 0,8 m<sup>3</sup> (principalmente como celda piloto para experimentación) hasta 300 m<sup>3</sup>, que corresponde al mayor volumen de celdas instaladas actualmente en las plantas de flotación más recientes o actualmente en etapa de construcción.

Tabla 5. Celdas de Flotación RCS

	Volumen (m <sup>3</sup> )	Motor (kW)	Aire (Am <sup>3</sup> /min)
RCS 3	3	11	2
RCS 5	5	15	3
RCS 10	10	22	4
RCS 15	15	30	6
RCS 20	20	37	7
RCS 30	30	45	9
RCS 40	40	55	10
RCS 50	50	75	12
RCS 70	70	90	15
RCS 100	100	110	19
RCS 130	130	132	23
RCS 160	160	160	25
RCS 200	200	200	30
RCS 300	300	315	40

Desde 1997 hasta 2013, se cuentan 2.016 celdas RCS entregadas a diferentes operaciones en el mundo, en aplicaciones tan variadas como cobre, platino, plomo, zinc, cobalto, hierro, molibdeno, fosfatos, carbonatos, oro, magnesio, plata, cromo y níquel. La mayoría de los equipos comisionados se encuentran en tamaños inferiores a 100 metros cúbicos y los mayores en operación industrial son de 200 metros cúbicos.

En paralelo, las columnas de flotación fueron desarrolladas desde 1990 en Francia por CISA, incorporando la tecnología Microcel, desarrollada en Virginia Tech a fines de los 80. CISA fue adquirida parcialmente por Svedala en el año 1998, que a su vez luego fue adquirida por Metso, completando el 100 % de la adquisición de CISA en 2011. Las columnas se diseñan y



fabrican de acuerdo a especificaciones de cada aplicación, con estanques de diámetro desde 0,6 hasta 6 metros y altura desde 9 hasta 15 metros.

La lista de referencia de columnas Metso Microcel cuenta 226 unidades entregadas desde 1995 para las siguientes aplicaciones: cobre (100), molibdeno (44), plomo (14), zinc (31), fierro (14), otros (23).

Las columnas de flotación y las celdas mecánicas son equipos complementarios entre sí, que cumplen diferentes funciones en una planta de flotación, y permiten implementar circuitos para procesar diferentes minerales en diferente escala.

De este modo, Metso cuenta con la experiencia y capacidad para proveer de equipos de proceso a cualquier planta de flotación como las existentes en la minería chilena o peruana, tanto de pequeña escala, mediana o especialmente de gran escala. Sin embargo, al revisar las principales instalaciones existentes en la región, sólo existe participación relevante de equipos Metso en columnas, siendo escasa la existencia de celdas RCS:

Tabla 5. Celdas Mecánicas en Flotación de Cobre (Chile)

	Estado	<b>Volumen unitario</b> m3	<b>Vol total instalado</b> (m3)	<b>Proveedor principal</b>
		42 - 127 -		
Codelco El Teniente	Op.	130	7.062	FLS (Wemco)
Codelco Chuquicamata	Op.	14 - 42 - 130	12.803	FLS (Wemco)/Outotec
AAS Los Bronces	Op.	42 - 85 - 250	10.622	FLS (Wemco)
Codelco Salvador	Op.	42 - 300	2.349	FLS (Wemco/Dorr-Oliver)
		38 - 100 -		
Codelco Andina	Op.	160	5.544	Outotec
MEL Los Colorados	Op.	44 - 160	13.641	FLS (Dorr Oliver)
FMI Candelaria	Op.	84 - 127	3.905	FLS
Collahuasi	Op.	130 - 160	11.700	Outotec
Los Pelambres	Op.	127 - 250	11.613	FLS (Wemco)
MEL Laguna Seca	Op.	130	18.720	FLS (Wemco)
Esperanza	Op.	257	8.500	FLS (Wemco)
Caserones	PEM	300	6.600	FLS (Wemco)
Codelco Ministro Hales	PEM	300	10.200	Outotec
Sierra Gorda	constr	300	10.200	Outotec
MEL OGP1	constr	300	21.000	Outotec
<b>Total</b>			<b>154.460</b>	

Tabla 6. Columnas en Flotación de Cobre (Chile)

	Estado	Area transversal unit (m2)	Volumen total inst (m3)	Proveedor principal
Codelco El Teniente	Op.	16	864	MolyCop
AAS Los Bronces	Op.	16 - 20	2.280	MolyCop/FLS (*)
Codelco Salvador	Op.	12	312	MolyCop
Codelco Andina	Op.	13 - 20	1.262	MolyCop
MEL Los Colorados	Op.	16	2.688	CESL
FMI Candelaria	Op.	12	1.229	FLS (*)
Collahuasi	Op.	16	2.080	Minnovex
Los Pelambres	Op.	12,5	2.450	FLS Minnovex/ <b>METSO</b>
MEL Laguna Seca	Op.	16	2.240	<b>(**)</b>
Esperanza	Op.	20	1.160	FLS (*)
Caserones	PEM			FLS (*)
Codelco Ministro Hales	PEM			MolyCop
Sierra Gorda	Constr.	16	736	<b>METSO</b>
MEL OGP1	Constr.	16	2.784	<b>METSO</b>
Total			20.085	

(\*) columnas CPT suministradas por FLS

(\*\*) retrofit a columnas existentes

Como muestra la tabla 5, no existe presencia de celdas Metso RCS en plantas de flotación de cobre en Chile, donde el mercado está dominado por los competidores FLSmith y Outotec, con equipos de hasta 30 años de antigüedad en algunos casos.

La participación de Metso en columnas Microcel comenzó mediante proyectos de Retrofit en equipos de Planta Laguna Seca (MEL) el año 2006-2008, que motivó la adquisición de esta tecnología para su proyecto de expansión de 2010.

Durante 2012 los proyectos Sierra Gorda (greenfield) y OGP1 (brownfield de Escondida) decidieron incorporar la tecnología Microcel a sus inversiones, mejorando así la presencia de Microcel en la región; durante 2013 y 2014 se

ha avanzado en la construcción y puesta en marcha de estas iniciativas. La misma decisión fue tomada por Quebrada Blanca fase 2 (brownfield) pero la prolongación de sus estudios ambientales ha postergado el inicio de su etapa inversional.

Tabla 7. Celdas Mecánicas en Flotación de Molibdeno (Chile)

	Estado	<b>Volumen unitario</b> <b>m3</b>	<b>Volumen total inst</b> <b>(m3)</b>	<b>Proveedor principal</b>
Codelco El Teniente	Op.	5 - 10	390	otro / <b>METSO</b>
Codelco Chuquicamata	Op.		nd	Nd
AAS Los Bronces	Op.		nd	FLS (Wemco)
Codelco Salvador	Op.	11,3	nd	Agitair
Codelco Andina	Op.	8,5 - 14,1	283	FLS (Wemco)
Collahuasi	Op.	nd	nd	Outotec
Los Pelambres	Op.	nd	nd	FLS (Wemco)
Caserones	PEM	nd	nd	Outotec
Sierra Gorda	Constr.	10 -20 - 30	nd	Outotec

Tabla 8. Columnas en Flotación de Molibdeno (Chile)

	Estado	<b>Area transversal unit</b> <b>(m2)</b>	<b>Vol total inst</b> <b>(m3)</b>	<b>Proveedor principal</b>
Codelco El Teniente	Op.	nd	nd	Nd
Codelco Chuquicamata	Op.	nd	nd	Nd
AAS Los Bronces	Op.	2,5 - 6	60	MolyCop/FLS
Codelco Salvador	Op.	nd	nd	Nd
Codelco Andina	Op.	1 - 3	60	Otro/ <b>METSO</b> (*)
Collahuasi	Op.	nd	nd	Nd
Los Pelambres	Op.	4,5	nd	Otro/ <b>METSO</b> (*)
Caserones	PEM	nd	nd	FLS (Wemco)
Sierra Gorda	Constr.	2	80	<b>METSO</b>

(\*) Retrofit

El negocio del molibdeno, comparado al del cobre es de menor escala, pero de mayor complejidad técnica. En este ámbito Metso ha introducido Microcel mediante Retrofit en plantas de Los Pelambres y Andina, lo que permitió introducir equipos completos en el proyecto Sierra Gorda, ya en construcción, y en Quebrada Blanca Fase 2, postergada por estudios ambientales.

Tabla 9. Celdas Mecánicas en Flotación de Oro (Chile)

	Estado	Volumen unitario m3	Volumen total inst (m3)	Proveedor principal
Yamana Gold, La Florida	Op.	50 - 20 - 5	435	<b>METSO</b>

Como es posible observar en las tablas 5 a 9, no existen en Chile celdas RCS en operaciones de cobre, sin embargo hay dos aplicaciones industriales correspondientes a la planta de flotación de oro La Florida, ubicada en Alhué, con 435 metros cúbicos, y la planta de molibdeno de El Teniente, con 390 metros cúbicos. Ambas referencias en conjunto no alcanzan a representar el 1% de la capacidad de celdas instalada en Chile. El motivo de no haber logrado una mayor participación con estos equipos en nuestra industria minera se basa en que Metso históricamente ha sido muy competitivo en el área de equipos de chancado y molienda, provenientes de sus marcas Nordberg y Marcy, dedicando en nuestro país todo el esfuerzo a esta línea de productos, dejando sin soporte técnico ni representación a los equipos de flotación, situación que contrasta con la situación observada en Perú, donde la presencia permanente de especialistas y esfuerzos de marketing han llevado a una presencia relevante en ese mercado.

En relación con la industria minera del Perú, las referencias de celdas mecánicas alcanzan a 195 unidades instaladas con un volumen total de 6205 metros cúbicos. El 24% de este volumen (39 unidades) corresponde a aplicaciones en flotación de cobre y el resto corresponde a equipos dedicados a flotación de plomo y zinc, que en ese país son de gran importancia.

Se estima que la capacidad de celdas mecánicas Metso instalados representa entre el 12% y 18% de la capacidad de flotación instalada en el Perú.

En cuanto a columnas de flotación, la tecnología Microcel en Perú se ha implementado mediante Retrofits en equipos de cobre, zinc y molibdeno en

la planta de Antamina, y en equipos de molibdeno de Cerro Verde. Esto permitió la incorporación de equipos completos para el proyecto Conga; lamentablemente el proyecto no ha concluido por conflictos sociales.

## **4.2 Propuesta de Valor Actual Equipos de Flotación Metso**

La oferta de Metso en equipos de flotación se complementa con la amplia gama de equipos de proceso y de conminución, más servicios, con que Metso abastece a la industria de procesamiento de minerales, comprendiendo chancadores, molinos y filtros entre otros.

Metso diseña y fabrica equipos de flotación para recuperación de minerales de

- Cobre
- Molibdeno
- Oro y plata
- Hierro
- Plomo
- Zinc
- Fosfato
- Carbón

El objetivo de una planta de flotación es concentrar los minerales de valor económico, presentes en baja concentración en los yacimientos, hasta obtener un producto de calidad comercial. Para lograr esto, los equipos en un circuito de flotación se agrupan en etapas. La combinación de etapas, donde cada una cumple una función específica permite alcanzar un resultado global que es la separación óptima entre especies de valor y material estéril. Un proceso de concentración es eficiente si logra reportar una elevada proporción de las especies de valor hacia el producto final, el que debe tener calidad adecuada para su comercialización o procesamiento posterior.

Para cumplir la función asignada a cada etapa de flotación, existen dos tipos de equipos con diferente modo de funcionamiento y en consecuencia diferente comportamiento: celdas mecánicas y columnas de flotación.

El desempeño de las celdas mecánicas favorece una alta recuperación de especies de valor, mientras que las columnas son más selectivas, y se utilizan en las etapas en que se obtiene el producto final del proceso.

### **4.2.1 Celdas Mecánicas RCS**

Los componentes principales de una celda de flotación mecánica RCS (Reactor Cell System) son:

- Tanque de acero cilíndrico
- Mecanismo de agitación
- Motor y sistema de transmisión
- Sistema de alimentación, descarga y sistema de control de nivel.
- Canaletas recolectoras de espuma

El corazón de una celda de flotación es su mecanismo de agitación, compuesto por un rotor y un difusor. Las funciones principales del mecanismo son mantener los sólidos en suspensión, dispersar el aire insuflado en pequeñas burbujas, y favorecer el contacto entre partículas y burbujas. El diseño del mecanismo RCS se caracteriza por entregar una efectiva dispersión y distribución del aire a través de dos patrones de flujo en el interior de la celda.

La simulación computacional de los patrones de flujo en el interior de la celda (CFD) muestra una efectiva mezcla de pulpa y aire, con zonas de alta energía en la mitad inferior del tanque, que favorecen la adhesión de partículas con burbujas, y una zona superior calma, para permitir un ascenso suave de burbujas hasta la zona de espuma.

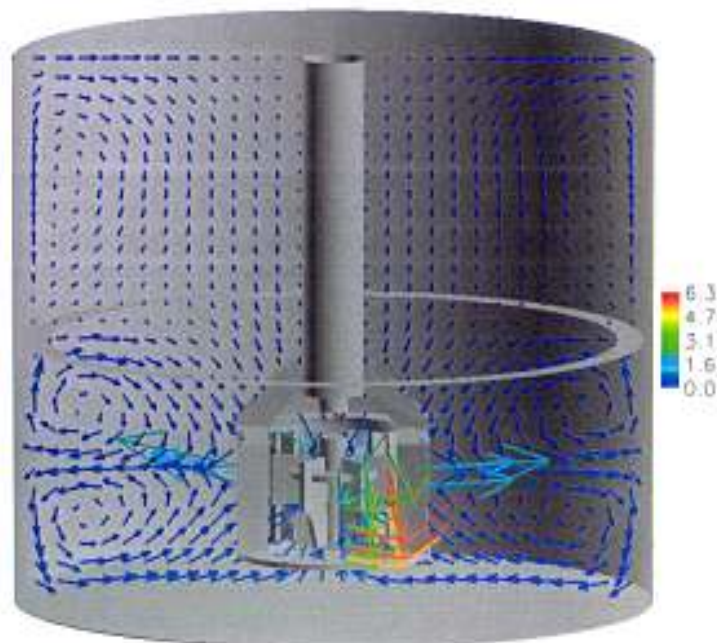


Fig 15. Modelación matemática de patrones de flujo en celda RCS

Estas características hidrodinámicas de la operación de una celda RCS le confieren los mejores rendimientos de la industria, alcanzando resultados sobresalientes en cuanto a recuperación y selectividad.

El mecanismo de agitación de una celda RCS tiene además las siguientes características destacables:

- Mantenimiento simple. Es posible reemplazar componentes individualmente o bien remover el conjunto completo por la parte superior, para reemplazar por un mecanismo nuevo.
- Energéticamente eficiente.
- Componentes con larga vida útil

La configuración y arreglo de celdas en una planta es flexible, permitiendo ocupar una superficie reducida, con lo cual se reducen los costos de montaje y construcción.

Metso ha desarrollado sistemas de control avanzado para mejorar la operación de bancos de celdas.

- Sistema control de nivel Feed Forward. Este avanzado sistema utiliza simultáneamente la información de nivel de varias celdas en serie, para tomar acciones en todas ellas, mejorando así el control de nivel de un banco, mitigando notoriamente el efecto de variaciones de flujo de alimentación. Al producirse cambios en el flujo de alimentación al inicio de un banco de celdas, este sistema toma acciones en avance, minimizando el efecto de los cambios, y logrando estabilidad en el conjunto de celdas.
- Visiofroth es un avanzado sistema de visión de espuma que, en conjunto con el software OCS, que analiza las imágenes captadas, toman acciones automáticas sobre las principales variables de operación como son el flujo de aire y nivel de espuma, para optimizar y estabilizar los parámetros de operación.

Estos sistemas de control avanzado pueden ser incorporados junto a las celdas, para mejorar su rendimiento.

#### **4.2.2 Columnas de Flotación**

Los componentes principales de una columna de flotación son:

- Tanque de acero esbelto

- Sistema de inyección de gas
- Canaletas colectoras de espuma
- Sistema de alimentación y descarga con control de nivel.
- Sistema de distribución de agua de lavado

La ausencia de sistema de agitación mecánica, la geometría del tanque, el empleo de agua de lavado y zonas de espuma de mayor profundidad que una celda mecánica, confieren a una columna la capacidad de obtener productos de mejor calidad. Sin perjuicio de lo anterior, el elemento que hace la diferencia en la operación entre una columna y otra es su sistema de inyección de gas.

La tecnología Microcel para inyección de gas consta de una recirculación de pulpa en la zona inferior del tanque. La pulpa recirculada se mezcla con gas, y al pasar a través de un dispositivo fijo denominado mezclador estático, que consta de deflectores de material cerámico, forma finas burbujas las que inmediatamente entran en contacto con partículas de mineral.

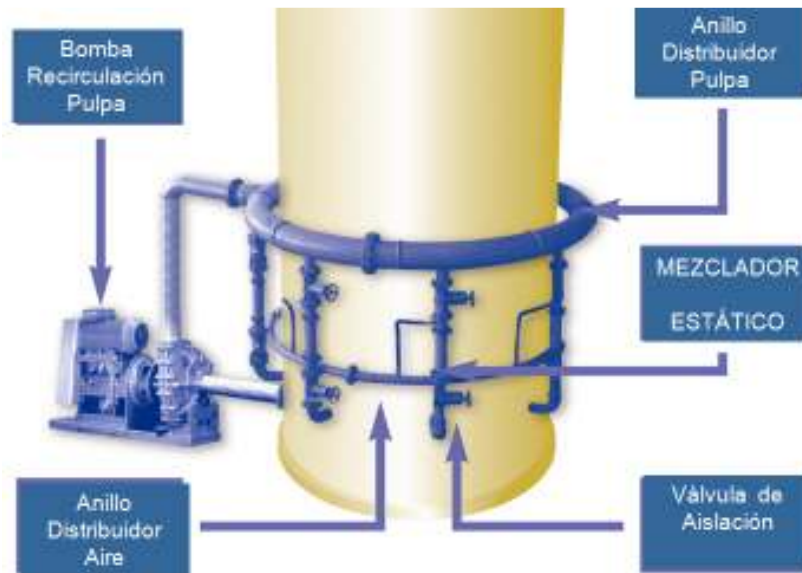


Fig. 16 Esquema de sistema Microcel en una columna de flotación

Comparado con sistemas de inyección internos tales como lanzas de aire, el sistema Microcel ha demostrado alcanzar mejores rendimientos en cuanto a recuperación y también en cuanto a calidad del producto.

Normalmente es posible a lo menos mantener o mejorar las leyes de concentrados, mientras que las recuperaciones de la columna mejoran en torno a 10 %, existiendo experiencias industriales de aumento de



recuperación hasta 18 % para flotación de cobre. Este aumento de recuperación en la etapa de columna, lleva a mejorar el circuito global entre 0,5 y 1,0 %, que representa un beneficio económico apreciable para una operación de beneficio de minerales.

El diseño de columnas es único para cada proyecto y aplicación. De esta forma, se tienen columnas con dimensiones exclusivas, con diámetro desde 0,6 hasta 6,0 metros y altura entre 9 y 16 metros. El sistema Microcel es dimensionado para cada caso y adaptado a cada aplicación.

Los materiales de revestimiento de tanques interior y exterior, son especificados para cada aplicación. El empleo de agua de mar en los proyectos más recientes, es una exigencia a tener en cuenta, la protección contra la corrosión está presente en los diseños.

Las columnas Metso Microcel pueden ser, al igual que las celdas RCS, dotadas de sistemas de control avanzado tales como Visiofroth y OCS, que permiten optimizar la recuperación y calidad del concentrado mediante el ajuste de los siguientes parámetros: nivel de pulpa, flujo de agua de lavado, flujo de aire y velocidad de bomba de recirculación.

Metso tiene la capacidad para suministrar los equipos de flotación y equipos auxiliares tales como bombas, sopladores y compresores bajo la modalidad EP, es decir, se desarrolla la ingeniería de detalles de los equipos, se fabrican y se entregan al cliente para que éste, mediante contratos de ingeniería, construcción y montaje, realice las etapas de montaje y puesta en marcha.

El conocimiento y gestión de equipos de flotación Metso a nivel mundial, se centraliza en Flotation Product Group, que es el área de la compañía que reúne toda la experiencia en flotación. En este grupo se desarrolla la ingeniería para el desarrollo de cada proyecto, de acuerdo a las especificaciones y necesidades de cada caso.

El diseño de equipos es desarrollado por los ingenieros de Metso. Los planos de arreglo general, de fabricación y de montaje contienen información precisa para cada etapa de avance de un proyecto.

La fabricación de tanques, cañerías y estructuras se realiza en maestranzas donde se realiza un riguroso control de calidad por parte de inspectores de Metso. Aspectos relevantes de la inspección técnica son:

- Trazabilidad de los materiales
- Calificación de los soldadores y técnicos
- Inspección de soldaduras y control dimensional

- Ensayos

Metso, a través del área Systems cuenta con la capacidad de desarrollar proyectos EPC, por lo que es posible entregar plantas completas instaladas, combinando celdas mecánicas RCS y columnas Microcel, que junto a equipos auxiliares tales como sopladores, compresores y bombas conforman el corazón de una planta de flotación.

El desarrollo de las etapas de ingeniería básica y de detalles de una planta de flotación, considera diferentes especialidades:

- Mecánica
- Estructural
- Cañerías
- Electricidad
- Instrumentación y control de procesos
- Control de riesgos y medio ambiente
- Programación y control de proyectos
- Control de costos
- Administración de contratos

#### **4.2.3 Proyectos EPC o EPS**

El crecimiento de la industria minera en Chile y Perú durante las últimas dos décadas, ha sido principalmente a través de un modelo de proyectos EPCM. Al enfrentarse a la etapa inversional, el dueño del capital encarga a consorcios de empresas de ingeniería y construcción, el desarrollo del proyecto bajo esta modalidad.

Entre las desventajas de este modelo para las empresas mineras, están el hecho de no poder exigir garantías de rendimiento de equipos a las empresas de ingeniería, sino que deben exigirlos a los vendedores propiamente tales. Al no existir este compromiso por parte de la empresa de ingeniería, su gestión en este sentido no es óptima. Por otra parte, los costos globales y cumplimiento de plazos de construcción han presentado desviaciones importantes en muchos proyectos. A partir de estos problemas se plantea una oportunidad a los proyectos futuros para desarrollar una relación directa entre el inversionista y el proveedor de equipos a través de contratos tipo EPC (ingeniería, adquisiciones y construcción) o alternativamente tipo EPS (ingeniería, adquisiciones y servicio o ingeniería, adquisiciones y suministro).

Contratos EPC. En este modelo la empresa proveedora de equipos, tal como Metso, debe mostrar la capacidad de entregar soluciones completas a sus

clientes, asumiendo no solo el suministro de equipos, sino también la ingeniería y su montaje.

Contratos EPS. Es un modelo similar a EPC, pero con exclusión de la responsabilidad por parte del proveedor de equipos, en el ámbito de movimiento de tierras y obras civiles, que pueden representar un alto porcentaje de las obras, y que es asumido por la empresa mandante. Considera entonces que la empresa mandante se hace cargo de las obras civiles hasta completar las fundaciones de los equipos, las cuales entrega al proveedor de equipos para continuar el montaje de estructuras y electromecánico.

La decisión de dejar de ser sólo un proveedor de equipos para ser un proveedor de plantas completas o áreas de éstas, pasará fundamentalmente por los siguientes análisis:

- Experiencia en proyectos similares anteriores.
- Relación de capital en equipos con respecto al capital total de una planta, que depende de la complejidad de cada proyecto. Para el caso de una planta de flotación esta proporción puede estar en un rango entre 0,2 hasta 0,5. En casos que las condiciones topográficas, de suelo, layout de la planta o condición climática son muy adversas, la proporción del valor de los equipos respecto al total disminuye.
- Análisis de riesgos: financieros, operacionales, administrativos, comerciales, ambientales, comunitarios, permisos.

En cada análisis se podrá definir si es procedente asumir un proyecto en modalidad EPC, o bien solamente en modalidad EPS, dejando las obras civiles fuera del alcance.

Por otra parte, el contar con un socio estratégico con experiencia en construcción y montaje puede ser un apoyo significativo en el momento de asumir responsabilidad en proyectos que comprenden mucho más que diseñar y suministrar equipos de proceso. Por esto, se debe buscar en cada oportunidad la posibilidad de compartir estos emprendimientos con empresas que complementen sus capacidades a las de Metso.

#### **4.2.4 Puesta en marcha**

Metso cuenta con ingenieros en diferentes especialidades capacitados para poner en servicio los equipos y alcanzar los más altos estándares de operación en breve plazo.

- Aseguramiento de calidad, riesgos y medio ambiente
- Definición de protocolos de pre-comisionamiento y comisionamiento
- Control de parámetros
- Entrenamiento a operadores y mantenedores
- Auditorías técnicas

#### **4.2.5 Servicios y repuestos**

El servicio post venta es fundamental para mantener la confianza de los clientes.

- Visitas a terreno
- Suministro de repuestos críticos
- Recomendaciones y solución de problemas

#### **4.3 Costo de propiedad de equipos de flotación**

El costo de propiedad está dado por todos los gastos directos e indirectos de adquisición de los equipos, más los beneficios de su uso, a lo largo de su ciclo de vida. Permite comparar entre diferentes alternativas para elegir la más conveniente.

Para los equipos de flotación, el presente análisis se realiza en forma cualitativa y comparativa respecto de las alternativas del mercado de equipos.

- Costo de Adquisición
- Costo de repuestos
- Costo mano de obra mantenimiento
- Costo mano de obra operación
- Costo insumos y suministros

Se debe hacer presente que el costo de propiedad de estos equipos no es significativo respecto al valor del producto originado de la cadena de valor de la que forman parte. A modo de ejemplo: una planta de flotación de cobre, en que los equipos de flotación propiamente tales tienen un costo de adquisición estimado de 20 millones de dólares, puede producir diariamente 1000 toneladas de cobre, por un valor de 6,5 millones de dólares, es decir, en tres días se produce el equivalente al valor de los equipos de flotación. Por lo tanto el valor real de estos equipos está no en su costo de adquisición o mantenimiento, sino en cómo contribuyen a la continuidad operacional, evitando detenciones, y como contribuyen marginalmente a incrementar los ingresos.

La contribución marginal a aumentar los ingresos quiere decir que dependiendo del proveedor de equipos, la tecnología que éste suministre a un proyecto y la continuidad operacional que brindan, pueden existir diferencias de performance que contribuyan a aumentar la recuperación o producción de elementos valiosos en un rango hasta 5% adicional. Basta con una diferencia de 1% en mayor producción, sólo gracias a un rendimiento superior de los equipos de flotación, para que su costo de adquisición se recupere íntegramente durante el primer año de operación.

Esto significa que las diferencias de costo de adquisición más el costo de operación y mantenimiento entre diferentes alternativas de equipos de flotación, no son tan relevantes en los flujos de caja final en relación con las diferencias de performance que hay entre ellos. En consecuencia, la elección de equipos debe estar fuertemente orientada a encontrar aquellos que permitan maximizar la producción, siendo las diferencias de costo de adquisición, operación y mantenimiento marginales

Dado que tanto para celdas mecánicas como para columnas, existe una amplia variedad de tamaños y especificaciones posibles, dependiendo de cada requerimiento, se toma como referencia para análisis a los siguientes dos equipos: celda mecánica de 300 metros cúbicos y columna de 16 metros cuadrados y 12,5 metros de altura.

#### Costo de adquisición

Celda mecánica: el precio una celda RCS es 20 a 40 % más bajo que equipos alternativos, sean estos autoaspirantes o de aire forzado. En el caso de celdas de 300 m<sup>3</sup> esta diferencia es entre 100 a 200 mil dólares por cada unidad.

Columna: el precio de una columna Microcel es 20 a 30 % mayor que alternativas con inyectores internos, afectado principalmente por el valor de bomba de recirculación. En el caso de una columna de 16 m<sup>2</sup> y 12 m de altura esta diferencia es entre 100 a 150 mil dólares por cada una.

#### Costo de Repuestos

Celda mecánica: corresponde principalmente al reemplazo de piezas de desgaste tales como rodamientos, impulsor y extremos de válvulas dardo, más el reemplazo de componentes de instrumentación tales como sensores de nivel y flujómetro de aire. No es posible conocer exactamente la diferencia de costo entre un proveedor y otro, sin embargo estos costos son comparables, y se estima que el soporte técnico oportuno y permanente por

parte del proveedor puede hacer una gran diferencia entre sufrir o evitar fallas y pérdidas operacionales.

Columna: una columna Microcel tiene como principal elemento de desgaste a los mezcladores estáticos, cuyo costo es equivalente al de los burbujeadores internos de los equipos alternativos. Además se debe realizar el reemplazo de componentes de instrumentos, al igual que con otras columnas. La bomba de recirculación requiere la mantención electromecánica estándar de una bomba centrífuga, reemplazando revestimientos y piezas de desgaste.

#### Mano de obra de mantenimiento

La calificación requerida para el mantenimiento de equipos Metso es equivalente a la de alternativas, es decir, en todos los casos se requiere personal altamente calificado y especializado, sin el cual los equipos pueden sufrir fallas y detenciones, causando graves pérdidas al proceso. Metso tiene en Chile y Perú la capacidad de dar soporte para el óptimo desempeño del personal de mantenimiento.

#### Mano de obra operaciones

Al igual que para el mantenimiento, en operaciones se requiere personal altamente calificado y permanente soporte por parte del proveedor de equipos, lo que redundará en un mejor comportamiento y por ende un mayor beneficio económico para el dueño.

#### Costo de Insumos y suministros

El principal consumo de celdas mecánicas corresponde a la energía eléctrica de agitadores más el consumo de sopladores; mientras que para las columnas el consumo principal es de los compresores que suministran el aire, más la bomba de recirculación del sistema Microcel.

La tabla siguiente muestra un cálculo basado en una planta con 30 celdas de 300 m<sup>3</sup> y 4 columnas de 16 m<sup>2</sup>, cuyo costo de adquisición es aproximadamente 20 MUSD.

Se observa que si estos equipos son Metso y operan en Chile, el gasto anual en energía es 12,4 MUSD, mientras que con otros equipos el gasto se reduce a 10,4 MUSD o 11,7 MUSD dependiendo de la tecnología implementada, es decir, se ahorra 16% o 6% de energía, que equivale al 10% o al 4% del valor de los equipos. Esto es significativo pues significa que con un menor consumo de energía se puede recuperar el costo de adquisición de los equipos, que normalmente se evalúan a un horizonte de 20 años o más.

**Comparación Gasto Energía Equipos de Flotación**

Precio Energía	Chile	150 USD/MWh
Precio Energía	Perú	75 USD/MWh

	Equipos Metso	Eq. Alternativos 1	Eq. Alternativos 2
<b>Celdas Mecánicas</b>	Aire Forzado	Aire Forzado	Autoaspirantes
Potencia instalada celda	315 kW	250 kW	350 kW
Potencia consumida celda	236 kW	188 kW	263 kW
Número celdas	30	30	30
Potencia Instalada Soplador	800 kW	800 kW	0 kW
Potencia Consumida Soplador	600 kW	600 kW	0 kW
Número Sopladores	2	2	0
<b>Columnas</b>	Microcel	Lanzas Aire	Lanzas Aire
Potencia instalada columna	150 kW	0 kW	0 kW
Potencia consumida columna	120 kW	0 kW	0 kW
Número columnas	4	4	4
Potencia Instalada Compresor	500 kW	600 kW	600 kW
Potencia Consumida Compresor	400 kW	500 kW	500 kW
Número Compresores	3	3	3
<b>Total Equipos Flotación y Auxiliares</b>			
Potencia Consumida	9,968 kW	8,325 kW	9,375 kW
Energía anual	82,950 MWh	69,281 MWh	78,019 MWh
<b>Gasto Anual en Chile</b>	<b>12,442 kUSD/año</b>	<b>10,392 kUSD/año</b>	<b>11,703 kUSD/año</b>
Diferencia c/r Metso		<b>-2,050 kUSD/año</b> <b>-16%</b>	<b>-740 kUSD/año</b> <b>-6%</b>
<b>Gasto Anual en Perú</b>	<b>6,221 kUSD/año</b>	<b>5,196 kUSD/año</b>	<b>5,851 kUSD/año</b>
Diferencia c/r Metso		<b>-1,025 kUSD/año</b> <b>-16%</b>	<b>-370 kUSD/año</b> <b>-6%</b>

Al realizar el mismo ejercicio para un escenario en Perú, se reducen las diferencias absolutas de gasto debido al menor precio de la energía en ese país, que es aproximadamente la mitad que en Chile. Es decir, la ventaja de

eficiencia energética con celdas alternativas es menos relevante en Perú que en Chile.

Aunque el diseño de celdas RCS cuenta con un diseño de su agitador que minimiza el consumo de energía para un comportamiento hidrodinámico optimizado, existe competencia de celdas con aire forzado que ostenta menores consumos para capacidades equivalentes. Por otra parte, la alternativa con celdas autoaspirantes tiene un consumo 10 o 20 % mayor.

Las columnas Metso Microcel tienen un consumo de energía superior a sus alternativas con burbujeadores internos, debido a la operación de bomba de recirculación. Esta diferencia anual, en el caso de Chile es de 56 mil dólares por año, que equivalen aproximadamente al 10% del valor de una celda.

Es relevante entonces por una parte optimizar los diseños para ajustar los consumos de energía, especialmente en celdas mecánicas, y por otra parte se debe contar con antecedentes para demostrar que este mayor consumo de energía está asociado con beneficios de productividad que superan con creces a los mayores costos de operación.

#### Beneficios de Celdas Metso

Celdas mecánicas. El mecanismo de agitación proporciona una mejor distribución del aire y tamaño de burbuja óptimo, con lo cual la recuperación de especies útiles es entre 1 y 2 % superior que con otras celdas de aire forzado, e incluso 5 % superior al obtenido con celdas autoaspirantes.

Columnas Microcel. El sistema de formación de burbujas permite una recuperación en esta etapa de entre 10 y 15 % superior, con casos demostrados por clientes hasta 18 %. Esta mejora constatada en etapas de limpieza es equivalente a 0,5 a 1 % mayor recuperación global planta.

Se puede observar que el beneficio marginal de contar con estos equipos en vez de sus alternativas, equivale a recuperar su valor de adquisición en meses o un año, lo cual es importante pues normalmente se espera que estos equipos permanezcan operativos por a lo menos 2 décadas, existiendo ejemplos de equipos de flotación operativos por más de 30 años.

De lo anterior se puede concluir que los equipos deben tener ante todo un comportamiento metalúrgico óptimo y confiabilidad operacional basada en servicio y repuestos oportunos.

Este análisis muestra que se debe realizar esfuerzos para demostrar a clientes que el comportamiento metalúrgico superior de los equipos es por



lejos más relevante que las diferencias de Capex y Opex posibles de evaluar. Este esfuerzo debe iniciarse desde las etapas de diseño y evaluación de equipos, y debe continuar durante las instancias de operación de los equipos. Debe darse prioridad a buscar y demostrar que los equipos tienen un comportamiento y confiabilidad superior a sus alternativas, para poder justificar su elección.

#### **4.4 Curvas de Valor de Oferta Equipos de Flotación**

En esta sección se analiza la posición competitiva de Metso en el negocio de equipos de flotación de Chile y Perú, bajo la óptica de la estrategia del océano azul, utilizando como herramienta las curvas de valor.

La oferta de Metso y de sus competidores en equipos de flotación se evalúa en diferentes atributos, desde el punto de vista del cliente. Este análisis se muestra en curvas de valor que permiten apreciar la posición de Metso en relación a sus competidores en cada aspecto. A partir de este análisis se realiza una propuesta tanto para celdas mecánicas como para columnas, en el sentido de modificar la oferta en relación con los competidores, de tal modo de diferenciarse y evitar competir en algunos atributos donde los competidores ya están bien posicionados. El intentar mejorar la posición en relación a la competencia en esos casos puede demandar excesivos recursos, además de llevar a un resultado incierto donde no es seguro el mejorar la posición de mercado.

El análisis muestra primero las curvas de valor evaluadas en tiempo pasado, es decir, reflejando la condición del periodo 2008-2012. A continuación se muestra la condición actual, que refleja los cambios introducidos a partir de 2012, para finalmente hacer una propuesta de cambios a implementar con un horizonte de 5 años hacia el futuro, es decir, cómo podría estructurarse la oferta a partir de 2014 hasta 2019.

Las curvas de valor siguientes muestran para los principales competidores de celdas mecánicas o de columnas, una evaluación comparativa de atributos relevantes, usando una escala de 1 a 5, donde el 5 representa la mejor evaluación posible y 1 representa la peor condición posible.

##### **4.4.1 Celdas mecánicas**

En el negocio de celdas mecánicas han tenido preponderancia dos proveedores, a saber, Outotec y FLSmidth. En el caso de Metso, si bien ha mantenido su oferta vigente, la participación en el mercado chileno ha sido escasa, mientras en el mercado peruano sí ha logrado un posicionamiento

más estable. La diferencia entre ambos países se debe fundamentalmente a la presencia de especialistas dedicados dando soporte local.

De este modo la figura N° 17 muestra la situación pasada en celdas mecánicas, donde Metso claramente está en condición de desventaja frente a su competencia, pues solamente alcanza niveles similares en los atributos de precio y consumo de energía. En el ámbito de capacidad de equipos disponibles, Metso estaba limitado sólo hasta celdas de 200 m<sup>3</sup>, mientras los competidores ya se posicionaban en 300 m<sup>3</sup>, que es el tamaño preferido por los proyectos de mayor tamaño. El soporte post venta local de Metso era importante sólo en Perú, dejando en este aspecto una debilidad en el mercado chileno.

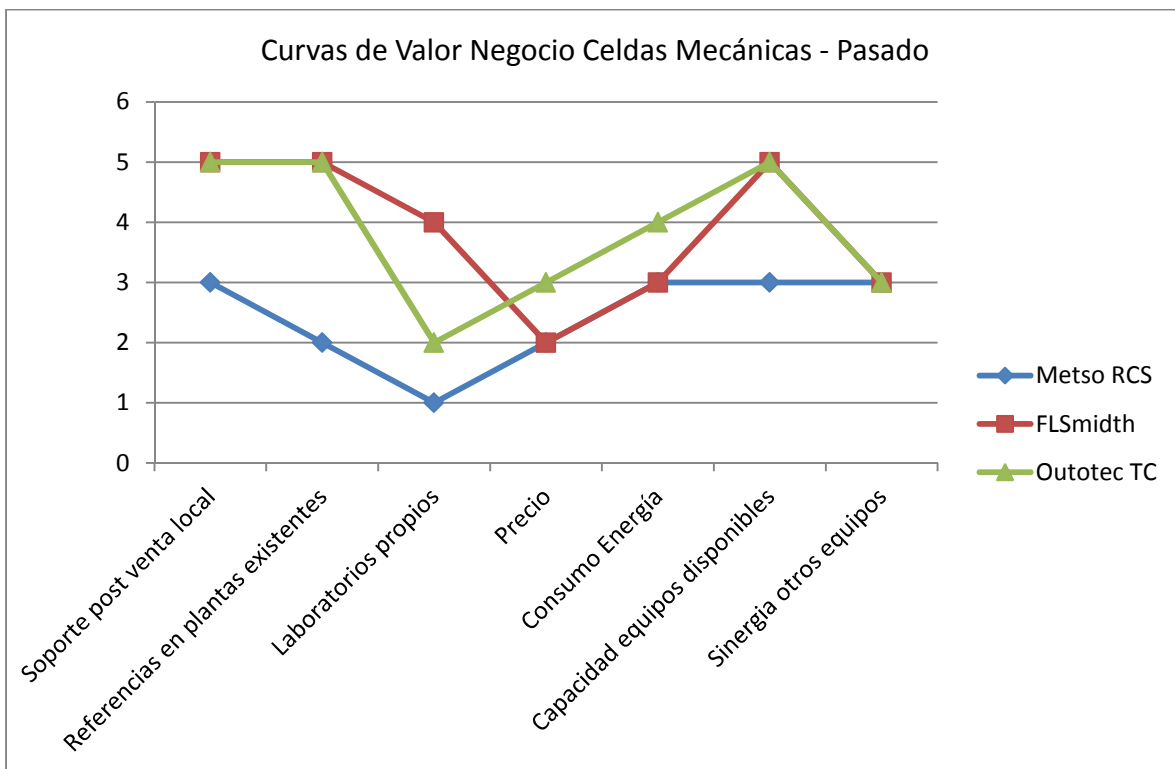


Fig. 17. Curvas de Valor mercado celdas mecánicas. Situación pasada.

Desde esta situación de desventaja, Metso evolucionó en los siguientes aspectos:

- Servicio post venta local en Chile
- Se amplió la oferta a equipos de 300 m<sup>3</sup>. Sin embargo, los competidores principales al mismo tiempo están en proceso de ampliar su oferta hasta 500 ó 600 m<sup>3</sup> de capacidad

- Se mejoró la relación y sinergia con equipos complementarios, principalmente columnas de flotación, de modo de mejorar la propuesta a clientes.

Simultáneamente se han incorporado nuevos actores en la oferta. Por una parte está la china BGRIMM, que ha suministrado celdas y columnas para el proyecto peruano de capitales chinos Toromocho, y a partir de enero 2014 ha abierto una oficina en Santiago. Por otra parte Tenova ha adquirido a Bateman, reorganizando y reimpulsando la oferta de estos equipos en la región. La figura 18 ilustra la oferta presente de celdas mecánicas.

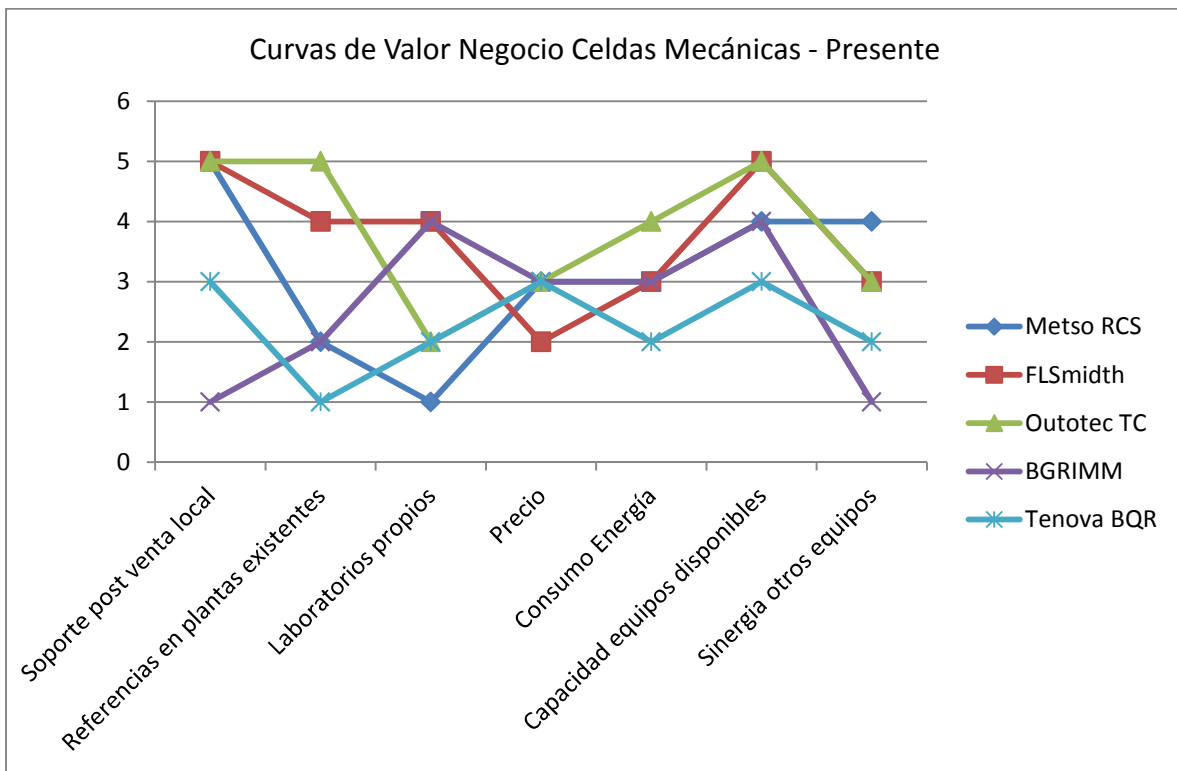


Fig. 18. Curvas de Valor mercado celdas mecánicas. Situación presente.

Se observa que Metso ha mejorado varios aspectos de su oferta, alcanzando la posición de sus competidores, e incluso superándoles en el aspecto de sinergia con equipos complementarios (columnas), sin embargo sigue estando en una franca condición de competencia directa sin lograr tomar ventajas definitivas.

En esta condición, para mejorar la posición competitiva, sería necesario reducir significativamente los precios para ubicarlos bajo la competencia, situación que es posible sólo si los costos lo permiten.

Por otra parte, se requeriría una inversión y costos de operación relevantes si se pretende competir en la oferta de laboratorios propios que prestan servicio a clientes en función de proyectos específicos.

En cuanto a la eficiencia energética de los equipos, su optimización requiere significativa inversión en desarrollo e investigación, para mejorar este atributo sin deteriorar el comportamiento metalúrgico. Además, este aspecto puede ser igualmente mejorado por los competidores, sin tener entonces la certeza de mejorar la posición competitiva.

#### **4.4.2 Columnas**

En el negocio de columnas de flotación Metso ha tenido durante la década pasada una participación más activa que en celdas mecánicas, basada principalmente en su atributo de entregar un mejor rendimiento metalúrgico, el que entrega importante beneficio económico para la operación, y en un soporte local limitado a tiempo parcial.

Todos los competidores con presencia en el mercado regional han basado su oferta en equipos con sistema de inyección de aire internos, que requieren menor inversión y pueden ser mantenidos con mayor simplicidad, sin embargo este ahorro no compensa la pérdida de costo de oportunidad por mejorar el comportamiento metalúrgico de los equipos.

En el caso de Eriez, este fue representado en la región por FLSmidth, quien comercializó sus equipos haciendo sinergia con sus celdas mecánicas.

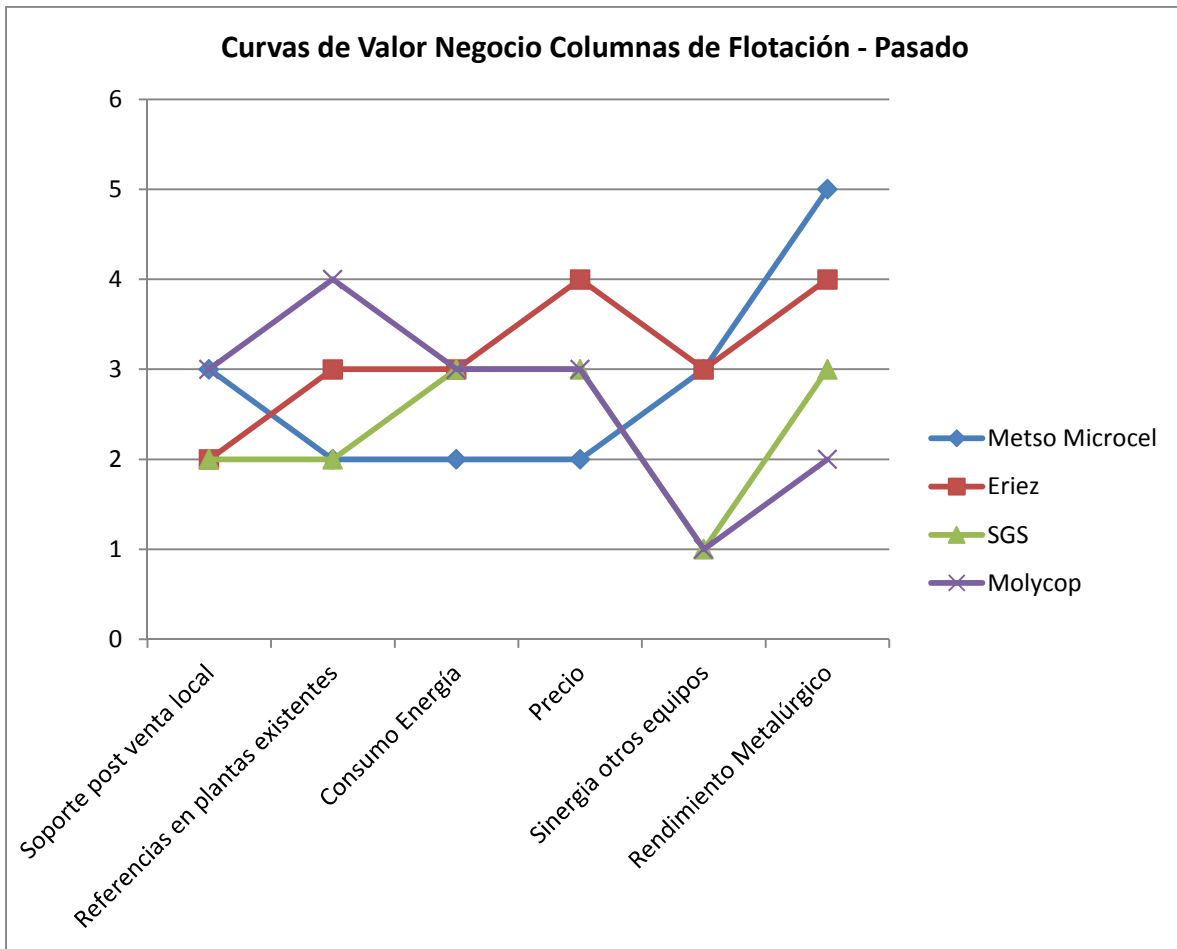


Fig. 19. Curvas de Valor mercado columnas de flotación. Pasado.

Moly Cop basó su oferta en su experiencia alcanzada desde comienzos de los años 90, y referencias en la industria nacional.

En la actualidad la oferta de columnas se ha visto incrementada por la presencia de la china BGRIMM, que suministró equipos a Toromocho en Perú, proyecto de capitales chinos.

Metso ha mejorado su capacidad de prestar servicio local y ha mejorado su capacidad de equipos de complemento, con lo cual sigue teniendo una posición competitiva en el mercado regional.

Por otra parte, Eriez ha incrementado su actividad en Chile, a través de una oficina local y asistencia de especialistas provenientes de Brasil. Su oferta tecnológica no supera en rendimiento a Metso, sin embargo es de menor complejidad en implementación y menor costo de inversión.

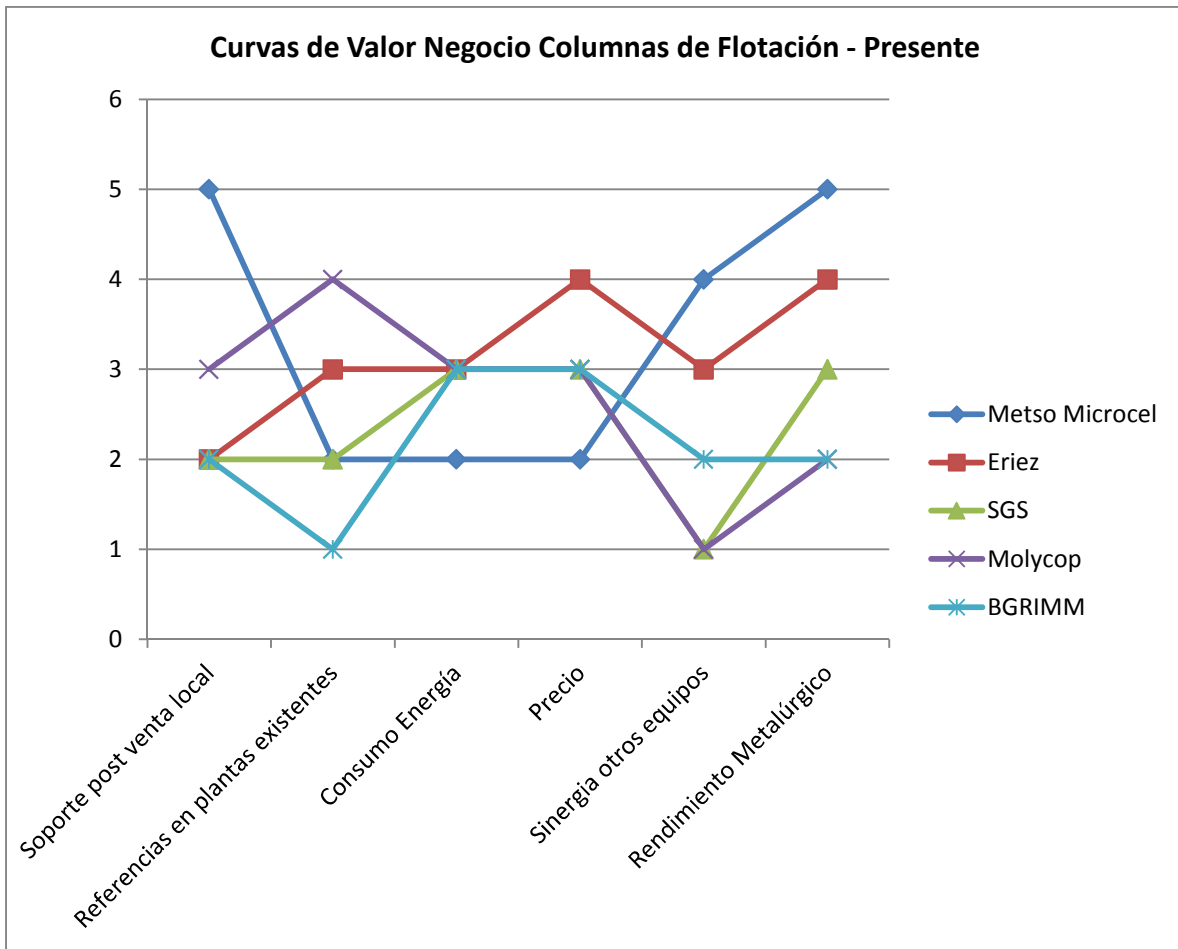


Fig. 20. Curvas de Valor mercado columnas de flotación. Presente.

Esta situación hace nuevamente necesario buscar un cambio en la oferta para hacer una diferenciación ante los clientes.

## 5 ESTRATEGIA PARA LA INTRODUCCIÓN AL MERCADO CHILENO Y PERUANO

La revisión del mercado regional de equipos de flotación y la posición de Metso en este muestra oportunidades de incrementar significativamente la participación, introduciendo las celdas RCS en la minería del cobre, reforzando la posición de columnas Microcel como equipos complementarios, brindando soluciones integrales en el ámbito de la concentración de minerales por flotación. Al consolidarse como proveedor de equipos de flotación, Metso mejora su posición de proveedor de soluciones para la industria de procesamiento de minerales.

Para completar un análisis de la posición de cada proveedor de equipos de flotación en el mercado de Chile y Perú, se analizan las siguientes variables:

- Capacidad equipos disponibles. Es la disponibilidad de equipos de diferentes tamaños, particularmente de gran tamaño, que en la actualidad alcanza a 300 m<sup>3</sup> como los mayores existentes en el mundo, y que son demandados por los proyectos de nuevas plantas de gran capacidad.
- Soporte post venta local. Se refiere a la capacidad de dar apoyo con personal establecido localmente para atender los equipos instalados.
- Referencias en plantas existentes. La industria minera es muy conservadora y en general considera de alto riesgo invertir e incorporar en sus procesos equipos de los cuales no existen referencias cercanas o de fácil acceso para evaluar. Por esto se considera la existencia de referencias cercanas de equipos de la misma marca y capacidad.
- Características técnicas. Se refiere al tipo de tecnología utilizada, su flexibilidad para la operación y rendimiento relativo a otros equipos alternativos.
- Consumo de energía. El costo de este suministro, que es significativo particularmente en Chile, hacen de esta característica un aspecto a considerar por sí mismo.
- Valoración de la Marca. Se refiere a aspectos intangibles del valor de la compañía en el mercado, además representa la capacidad de esta para proveer soluciones integrales, integrando a este equipo con otros que se complementan para formar procesos integrales, desde chancado hasta la filtración de productos finales.

La valoración estimada para cada proveedor es aproximada y referencial, pues estos equipos venden en general a través de licitaciones de cada proyecto, donde los criterios de cada evaluador pueden diferir.

Se evalúa con puntuación entre 1 y 5, donde 1 es la peor valoración y 5 la mejor.

Tabla 10. Análisis posición competitiva de proveedores de celdas mecánicas

<b>Atributo</b>	<b>Valor</b>	<b>Metso RCS</b>	<b>FLSmidth Wemco</b>	<b>FLSmidth Dorr-O</b>	<b>Outotec TC</b>	<b>BGRIMM</b>	<b>Tenova BQR</b>
Capacidad equipos disponibles	10%	3 - 4	4 - 5	4 - 5	4 - 5	2 - 4	2 - 3
Soporte post venta local	10%	4 - 5	4 - 5	4 - 5	4 - 5	1 - 2	1 - 3
Referencias en plantas existentes	10%	1 - 2	3 - 4	2 - 3	4 - 5	1 - 2	1 - 2
Características técnicas	10%	3 - 5	3 - 4	3 - 5	3 - 5	3 - 4	2 - 4
Consumo Energía	15%	3 - 4	2 - 3	3 - 4	4 - 5	3 - 4	2 - 4
Valoración de la Marca	10%	4 - 5	3 - 4	3 - 4	3 - 4	1 - 2	2 - 3
Precio	35%	3 - 5	3 - 4	2 - 4	3 - 4	3 - 4	3 - 4
<b>Global</b>		<b>3,0 - 4,5</b>	<b>3,1 - 4,1</b>	<b>2,8 - 4,2</b>	<b>3,5 - 4,6</b>	<b>2,3 - 3,4</b>	<b>2,2 - 3,5</b>

La revisión de atributos para celdas mecánicas de Metso, resulta con un rango final entre 3,0 y 4,5, que es similar al de otras celdas como FLSmidth y Outotec. Solamente las celdas de BGRIMM y Tenova se presentan en un rango inferior de valoración, principalmente por su falta de referencias en el mercado, aspecto que también adolecen las celdas Metso, pero también por la falta de asistencia técnica local y por su menor valoración de marca y sinergia que esta puede aportarles.

Si bien las celdas mecánicas de Metso resultan competitivas frente a sus principales competidores Outotec y FLSmidth, el aspecto que más les perjudica es la falta de referencias en el mercado, como también lo es un mayor consumo específico de energía. En este último aspecto, las celdas Outotec han alcanzado un mejor rendimiento, apalancados también por su



mayor cantidad de equipos instalados, que dan mayores oportunidades de optimizar los diseños.

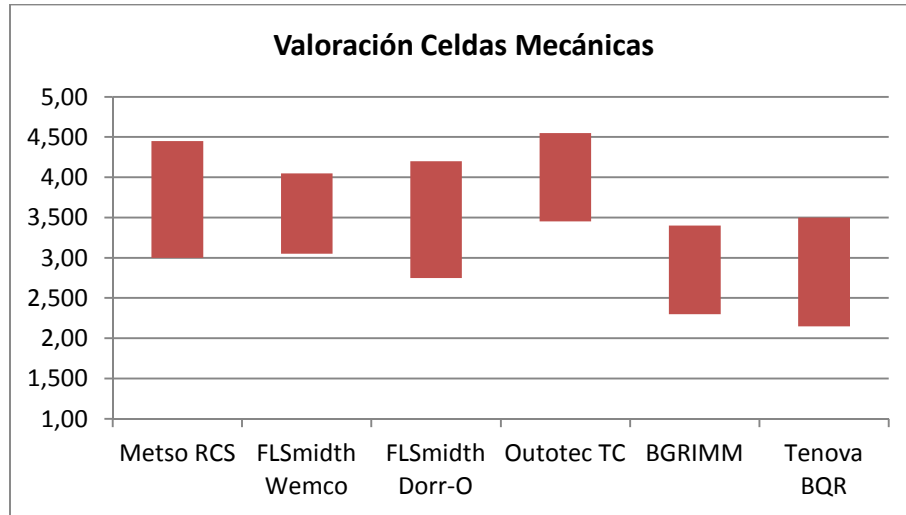


Fig. 21. Comparación posición competitiva proveedores celdas mecánicas.

Tabla 11. Análisis posición competitiva de proveedores de columnas de flotación

Atributo	Valor	Metso Microcel	Eriez Cavtube	Eriez Slamjet	SGS	Molycop	BGRIMM
Soporte post venta local	10%	4 - 5	2 - 4	2 - 4	1 - 3	3 - 4	2 - 3
Referencias en plantas existentes	10%	2 - 4	1 - 3	2 - 4	3 - 5	3 - 4	1 - 2
Características técnicas	25%	3 - 5	2 - 4	2 - 3	3 - 4	2 - 4	2 - 3
Consumo Energía	15%	2 - 4	2 - 3	3 - 4	3 - 5	3 - 4	3 - 4
Valoración de la Marca	10%	4 - 5	2 - 3	2 - 3	2 - 3	2 - 4	2 - 3
Precio	30%	2 - 3	2 - 4	2 - 4	2 - 3	3 - 4	2 - 4
<b>Global</b>		2,7 - 4,2	1,9 - 3,7	2,2 - 3,7	2,4 - 3,8	2,7 - 4,0	2,1 - 3,4

FLSmith ha centrado su oferta principalmente en celdas de tecnología autoaspirante (Wemco) en desmedro de las celdas de aire forzado Dorr-

Oliver, que han perdido competitividad durante la última década. Esto ha favorecido las posibilidades de Outotec para crecer en el mercado, que suele valorar positivamente la tecnología del aire forzado por entregar un mejor control de la operación.

La china BGRIMM solamente tiene como referencia la instalación de celdas en el proyecto Toromocho en Perú, que durante los primeros meses de 2014 ha comenzado su puesta en marcha y del cual no hay más información cercana.

En el caso de Tenova, compañía que ha heredado el conocimiento de Delkor, marca reconocida en equipos tales como filtros y espesadores, pero desconocida en el mercado regional en el ámbito de celdas de flotación. Ha desarrollado celdas hasta 130 m<sup>3</sup> solamente.

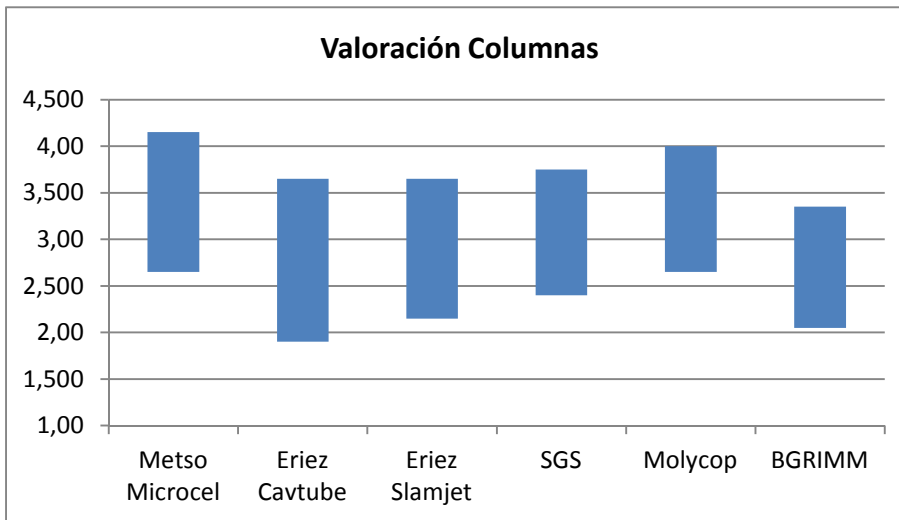


Fig. 22. Comparación posición competitiva proveedores columnas de flotación.

Las columnas de flotación Metso han alcanzado una posición competitiva en el mercado, gracias a la incorporación de su tecnología en equipos existentes, mediante su reconversión, y luego por el comisionamiento de equipos nuevos completos en plantas de Minera Escondida y Sierra Gorda. El rendimiento de equipos es una ventaja relevante, como también lo es la posibilidad de integrarse con celdas mecánicas del mismo proveedor, capacidad que no tiene ningún otro competidor hasta el momento.

Eriez ofrece dos diferentes tecnologías de inyección de aire, y esta mayor flexibilidad le da una ventaja que ningún otro proveedor de columnas dispone. Sin embargo, adolece de la capacidad de brindar una oferta más

integrada con otros equipos complementarios, tales como celdas mecánicas, molinos o filtros.

SGS posee el conocimiento de columnas heredado de Minnovex, sin embargo ha enfocado su actividad principalmente en el suministro solamente de inyectores de aire y sistemas de control de procesos, dejando de proveer equipos completos.

Molycop ha sido proveedor de muchos equipos en la industria minera de Chile, sin embargo su actividad principal es como proveedor de bolas para molienda, por lo que su oferta de equipos de proceso es limitada sólo a estas columnas, y no ha desarrollado capacidad para complementar su oferta con otros equipos o mejores atributos que enriquezcan su oferta.

BGRIMM, sólo se encuentra en el proyecto peruano Toromocho, donde aún no existe información suficiente sobre esta experiencia, para el resto de la industria.

La revisión de la posición de Metso frente a sus competidores lleva a plantear las actividades más relevantes que permitirían mejorar su posición competitiva y con esto lograr una participación de mercado y liderazgo en la industria.

## **5.1 Curvas de Valor propuesta celdas mecánicas**

Para diferenciarse de los competidores, se propone incorporar como parte de la oferta, tecnologías que Metso ha desarrollado, pero que no han sido consideradas como parte integral de la oferta de equipos. Estas tecnologías apuntan a mejorar el rendimiento y productividad de los equipos.

- Control de Nivel Feed Forward. Es una estrategia de control de nivel de celdas que reduce el impacto de perturbaciones externas, logrando una mayor estabilidad a lo largo de una fila de celdas. Esta estrategia consiste en utilizar de un modo más proactivo y múltiple la información obtenida de los medidores de nivel de cada banco de celdas; el sistema toma acción anticipadamente en los bancos de celda posteriores, mejorando la estabilidad y el resultado operacional
- Visiofroth. Es una tecnología probada que se basa en la instalación de cámaras para visualizar la espuma. El análisis de la imagen realizado al integrar con un software de control avanzado, permite tomar acción sobre los controles de nivel y de flujo de aire de cada celda, optimizando su operación de acuerdo a la estrategia de operación de la planta.

- Estrategias de Control Avanzado. Se implementan estrategias de tipo control individual por celdas, perfiles de velocidad por bancos o control global de la planta de flotación. Con esto se maximiza la recuperación de especies de valor y se optimiza la calidad de productos finales, mediante el ajuste de parámetros de operación de los equipos o de sus variables de entrada, tales como dosis de reactivos.
- Smart Equipment Technology. Es un concepto en desarrollo que considera el uso de tecnologías de punta en comunicación e interfase entre usuario y equipo, como así también permite asistencia remota en línea de especialistas de Metso, acceso a manuales y solución de problemas en línea, entrenamiento remoto, control de procesos. Se consideran tres puntos de conexión con cada equipo.

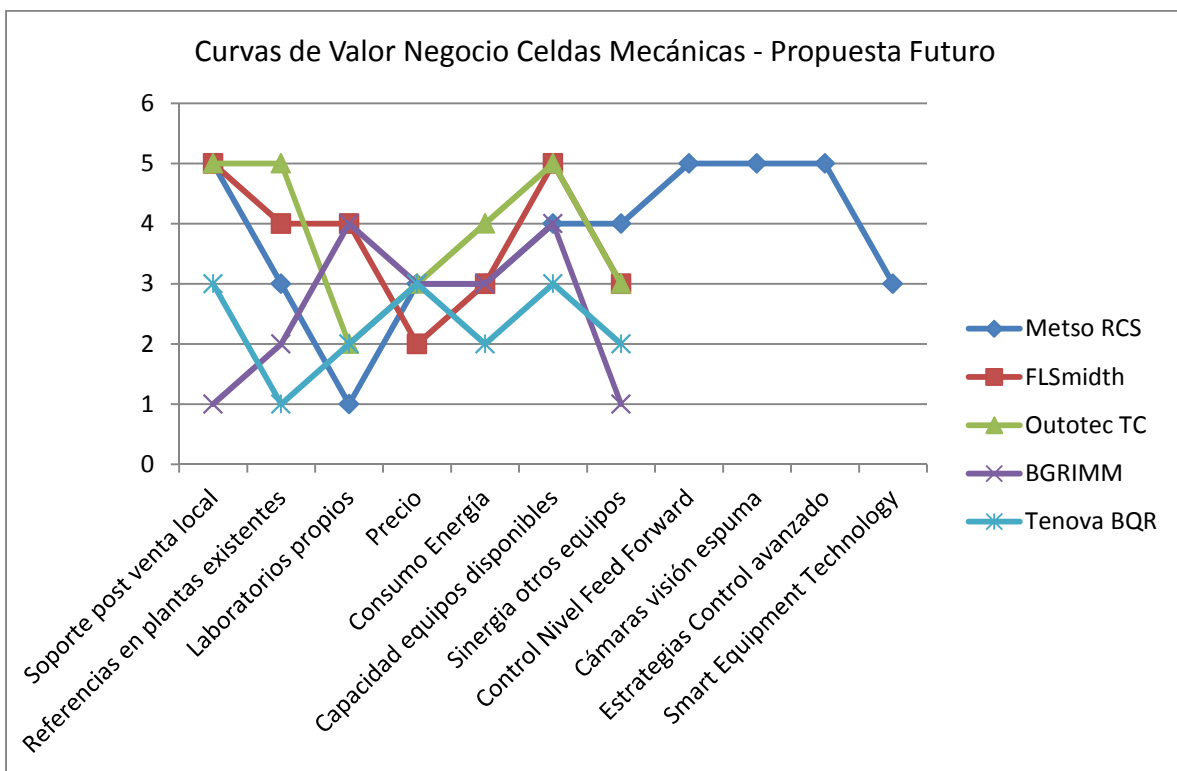


Fig. 23. Curvas de Valor mercado celdas mecánicas. Propuesta futuro.

Estos atributos en la oferta de equipos de flotación de Metso permiten diferenciarla de sus competidores, quedando en una posición de ventaja que la distanciará al menos temporalmente la competencia.

## 5.2 Curvas de Valor propuesta Columnas de Flotación

Se propone, al igual que para celdas mecánicas, dotar a los equipos de columnas de tecnología de punta en control avanzado de procesos, cámara de visión de espuma y tecnología Smart Equipment, que brindarán a operadores y mantenedores la mejor experiencia y beneficios con estos equipos.

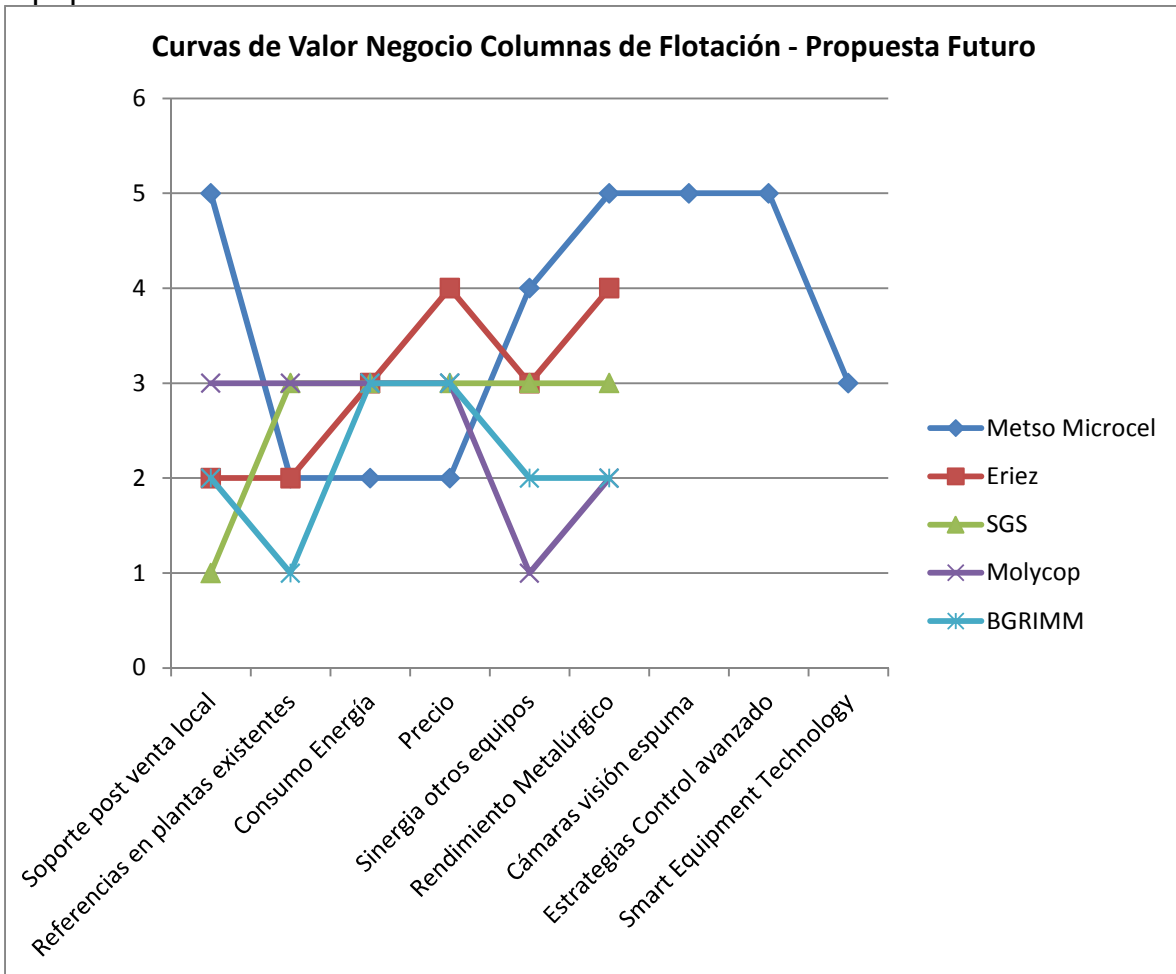


Fig. 24. Curvas de Valor mercado columnas de flotación. Propuesta Futuro.

## **6 Actividades Clave a Desarrollar**

El mercado global de equipos de flotación, se ha desarrollado por más de un siglo y apunta a un nicho específico como son las empresas mineras que procesan minerales flotables tales como sulfuros.

La tecnología de los equipos se ha desarrollado y acotado de acuerdo a la demanda. Las empresas mineras deben asumir grandes riesgos en cada uno de sus proyectos, debido principalmente a la dificultad e incertidumbre para caracterizar los yacimientos, y también por la variabilidad del precio de sus productos. Las inversiones requeridas son elevadas, los permisos y restricciones ambientales crecientes dificultan su desarrollo. Esto les hace ser extremadamente conservadoras en todos los aspectos en que sí tienen más control, y en esto no escapan los diseños y tecnología de plantas flotación. Es así como la oferta de equipos de flotación se ha adaptado a los requerimientos de empresas mineras, convergiendo a tecnologías muy definidas y un número muy acotado de competidores.

Ante este escenario de un mercado de equipos de flotación de características de alta madurez, se plantea el desafío de crecer en participación de mercado a partir de una posición muy minoritaria o casi inexistente en el caso de Chile.

Se describe a continuación las actividades más importantes a desarrollar para mejorar la competitividad de Metso en el mercado de equipos de flotación de la minería chilena y peruana.

### **6.1 Reducción de Costos de Fabricación y suministro**

Las celdas mecánicas se diferencian entre sí principalmente por su tamaño (volumen) y forma de ingreso del aire (forzado o autoaspirado). Una vez que se ha definido la cantidad, tamaño y disposición de celdas a instalar en una planta de flotación, los operadores de plantas suelen tener preferencias por un tipo de inyección de aire por sobre el otro, principalmente por sus experiencias previas que llegan a tomar la forma de paradigmas adquiridos.

Aunque conceptualmente el sistema de inyección de aire forzado es superior al sistema autoaspirado, por brindar mejor control de la operación y en consecuencia se logra un mejor resultado metalúrgico y económico, este tema no tiene consenso en la industria. El único fabricante de celdas autoaspirantes de gran volumen (FLS-Wemco), ha logrado posicionar su producto a pesar de la dificultad técnica para sustentar este mecanismo con

equipos de mayor tamaño. La ausencia de equipos auxiliares para inyección de aire es una ventaja de la que ha obtenido buenos resultados.

Normalmente la única forma de validar la ventaja técnica y económica de un tipo de inyección de aire frente a otro es mediante pruebas industriales en paralelo, que son de alto costo y complejidad. Debido a esto, normalmente la elección del proveedor de celdas de flotación se basa principalmente en el costo de inversión, seguido por otros criterios tales como estimación de costos de operación-mantenimiento y servicios de post venta.

Desde el punto de vista de Metso, cuyos equipos tienen escasos referentes en la industria regional, un precio competitivo es clave para cambiar esta realidad. De esta forma es posible aumentar la presencia en diferentes operaciones industriales, y a partir de esto sentar las bases para demostrar otras ventajas, principalmente de mejor performance y rendimiento metalúrgico.

Para mejorar la posición competitiva en cuanto a costo, se han identificado las siguientes actividades

### **6.1.1 Mejoramiento diseño de celdas.**

Esta actividad debe estar orientada a mejorar dos aspectos del producto: la reducción de peso de los equipos y la reducción del área de instalación.

La reducción del peso se obtiene mediante las siguientes vías:

- reducción de espesores de acero al mínimo que cumpla los requerimientos estructurales y sísmicos
- eliminación o simplificación de partes tales como cajones de traspaso y descarga, pasarelas peatonales

Para esta actividad se deben considerar las experiencias previas y las mejores prácticas observadas en la industria.

### **6.1.2 Desarrollo y selección de proveedores de componentes claves y equipos auxiliares**

Entre los equipos auxiliares se encuentran:

- Sopladores
- Compresores
- Motores eléctricos
- Motoreductores
- Instrumentos de medición de flujo de aire, agua y pulpa

- Válvulas de control de flujo de agua y aire
- Sensores de nivel ultrasónicos, radar o de presión.

Se debe identificar para cada uno de estos componentes, los proveedores que mejor ajusten sus especificaciones a los estándares de Metso, plazos de entrega, servicio post venta en el país.

Se propone buscar con los principales proveedores, alianzas estratégicas en que las ofertas de Metso consideren sus equipos a su costo, minimizando los márgenes por incluir estos componentes, permitiendo con esto hacer la oferta me Metso más competitiva.

### **6.1.3 Identificación de maestranzas certificadas de menor costo.**

El costo de fabricación de tanques y estructuras de acero es relevante en la estructura de costos de equipos de flotación, representa entre el 50% y 70% del costo de un equipo. Esto considera tanto la manufactura del acero como su terminación superficial y embalaje.

Históricamente los tanques de equipos de flotación para el mercado regional de Chile y Perú, se fabrican en el mismo país, específicamente en maestranzas de Santiago, Rancagua, Antofagasta, Lima y Arequipa. Por otra parte, los diseños de tanques de celdas de mayor tamaño consideran la manufactura en maestranza de grandes secciones a ser ensambladas en su destino final, que requieren de transporte como carga sobredimensionada hasta los sitios de proyecto. Este transporte de grandes cuerpos de tanques por distancias que pueden superar los 1500 kilómetros, representa un costo importante y principalmente una alta complejidad logística para los proyectos.

Al revisar los costos de fabricación en diferentes maestranzas en el mundo, se encuentra que en Chile los costos de fabricación son los más altos en el mundo entre más de 15 maestranzas estudiadas, duplicando el costo de otros países.

Se propone evitar las maestranzas de mayor costo, encabezadas por las chilenas, y considerar la fabricación de tanques en los países de costo más competitivo. Además se debe adaptar los diseños de tanques de tal forma que puedan ser transportados en partes de menor tamaño, factibles de introducirse en contenedores para ser transportados como carga normal a grandes distancias, vía marítima. De esta forma incluso el transporte local desde puerto hasta faena podría tener este carácter, y el mayor costo de



transporte internacional se compensaría en parte con un menor costo de transporte local con una logística más simple y menores riesgos.



Fig. 25. Transporte de tanques de celdas de flotación. Carga sobredimensionada para transporte por carreteras.

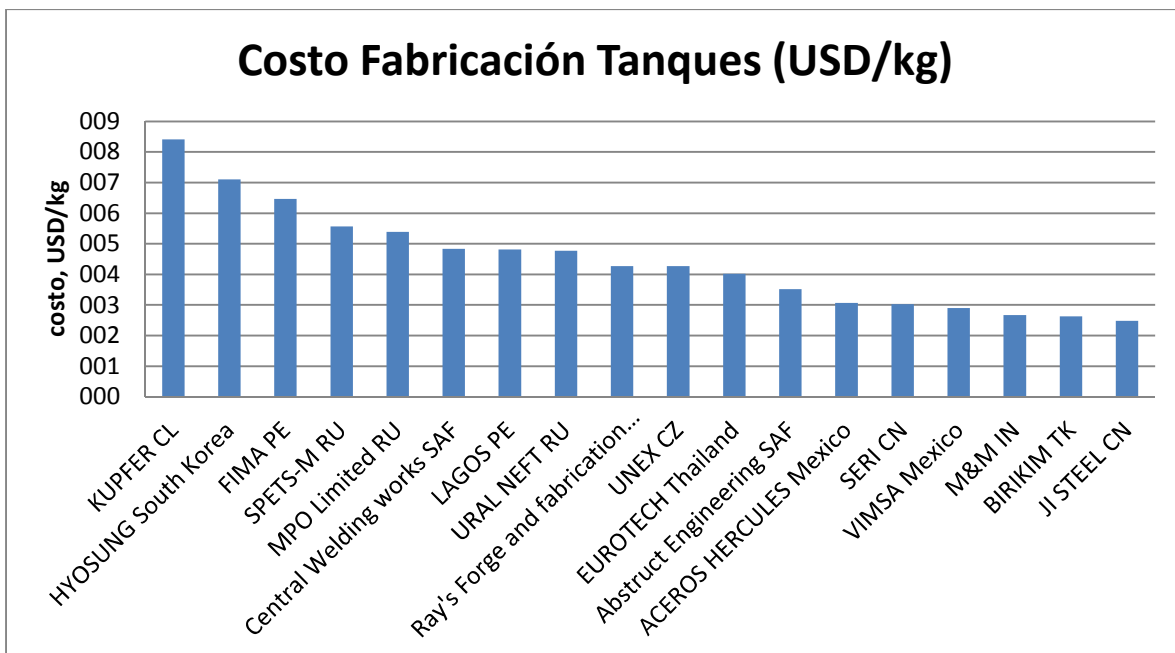


Fig. 26. Benchmarking de costos fabricación tanques de celda de flotación.

De esta forma los costos de fabricación pueden reducirse entre 25% a 35%, permitiendo transferir a los clientes el menor precio, logrando así una posición mucho más competitiva.

## 6.2 Servicio

La aceptación y conocimiento de estos productos en la industria minera de la región no es posible sin la existencia en estos países de especialistas que presten apoyo a todas las actividades relacionadas con la promoción, comercialización y servicio post venta. Son actividades clave:

- Establecer relaciones de confianza con operadores de plantas, y a través de estos entregar asesoría especializada.
- Implementación de servicio apoyo a operaciones mediante visitas focalizadas y monitoreo remoto de datos, con informes periódicos.

## 6.3 Validación de Tecnologías de Flotación Metso

Las tecnologías que dispone Metso deben ser permanentemente mejoradas y junto con ello validadas por la industria minera.

- Reconversión de otras celdas mecánicas existentes, adaptando mecanismos RCS, con foco en instalaciones con celdas autoaspirantes principalmente.
- Reconversión de columnas existentes a sistema Microcel
- Se debe contar con la capacidad para desarrollo de pruebas piloto in-situ o en planta piloto. Pruebas orientadas a demostrar el mejoramiento de performance metalúrgico. Trabajo a realizar a través de socio estratégico con acuerdo de confidencialidad vigente.

Nuevas aplicaciones de tecnología Microcel:

- Aplicación de tecnología Microcel como etapa de flotación pre-rougher
- Aplicación de tecnología Microcel como sistema de aireación en tanques de lixiviación de oro.

Desarrollo de nuevos diseños basados en Microcel

La tecnología Microcel tiene un potencial para generar nuevos diseños de celdas de menor tamaño y con esto menor costo de inversión y operación, basado en el uso del sistema de contacto pulpa-aire en diferentes configuraciones.

Se propone estructurar un área de desarrollo tecnológico, dedicado a la investigación tecnológica de nuevos diseños de equipos, para poner a disposición de la industria una alternativa atractiva técnica y económica.

Para el desarrollo de esta actividad se requiere contar con capacidad de laboratorio y planta piloto de investigación de procesos. Dado que esta es una actividad fuera del alcance del negocio de Metso, se propone buscar un socio estratégico con esta capacidad y experiencia, con quien realizar este desarrollo tecnológico.

#### **6.4 Difusión y Promoción**

La baja participación histórica de Metso en el mercado regional de equipos de flotación, es motivo para hacer esfuerzos en la difusión de estas tecnologías tanto en la industria como en entidades relacionadas.

- Charlas en Universidades. Acercamiento a estudiantes de carreras afines a los procesos de metalurgia extractiva, para familiarizarlos con los productos y servicios de la empresa.
- Charlas técnicas en compañías mineras. Organización de charlas técnicas sobre diferentes tópicos de los equipos y servicios ofrecidos por Metso, desde chancado hasta filtrado, pasando por flotación. Permite acercarse a las faenas, facilitando la participación de operadores y mantenedores, evitándoles viajes y costos.
- Charlas en empresas de ingeniería. Permiten entregar antecedentes de los equipos Metso a los especialistas que desarrollan proyectos y proponen alternativas a las empresas mineras mandantes.

#### **6.5 Desarrollo de Herramienta de simulación**

Se propone incorporar los equipos RCS y Microcel del proceso de flotación en un simulador de procesos integrado, para ser utilizado por especialistas de la compañía como herramienta de marketing.

El desarrollo de esta herramienta requiere la obtención de datos de operaciones existentes y mediante la validación de modelos de simulación del tipo cinético, se obtiene una herramienta útil para diseñar y/u optimizar procesos.

Al utilizar esta herramienta se podrá mostrar a los clientes la capacidad de Metso para ayudar a encontrar soluciones optimizadas para cada requerimiento de la industria.

## **6.6 Mejoramiento o desarrollo de nuevos productos**

### Desarrollo de celdas de mayor capacidad

La industria ha alentado el crecimiento en escala de las celdas mecánicas de flotación, siendo las de mayor capacidad instaladas de 300 m<sup>3</sup>, que coinciden con los equipos de mayor capacidad que ha desarrollado Metso. Sin embargo ya existe por parte de competidores equipos de capacidad superior, hasta 600 m<sup>3</sup>.

Se debe realizar un estudio del mercado con estos antecedentes, es decir, se debe investigar el interés y plazos en que la industria requerirá equipos de mayor capacidad. Con esto se debe definir la conveniencia y oportunidad para desarrollar celdas de volumen superior a las mayores actuales (450 - 600 - 800 m<sup>3</sup>).

### Desarrollo de Burbujeador Interno

Las columnas Metso disponen solamente de sistemas de burbujeadores externos Microcel. Si bien esta tecnología les confiere un rendimiento metalúrgico superior, les resta competitividad desde el punto de vista del costo de inversión, por el hecho de requerir una bomba de recirculación que no es necesario en las columnas con burbujeadores internos.

Se propone desarrollar un burbujeador interno similar a los que normalmente ofrecen otros proveedores de columnas, para competir en condiciones de costo de inversión equivalentes.

### Mejoramiento de diseño sistema Microcel

Se debe recopilar información de la experiencia con Microcel por parte de operadores en Chile y Perú, para identificar los principales problemas. A partir de esto se debe plantear modificaciones a los diseños, con foco en aumento de disponibilidad y reducción de tiempos y costo de mantenimiento.

## **6.7 Recursos Claves**

Los recursos clave requeridos para desarrollar la estrategia de introducción al mercado regional, de los equipos de flotación de Metso son básicamente los Ingenieros de Soporte Técnico. Ubicados en Chile y Perú, con disponibilidad para cubrir toda el área geográfica visitando clientes, y participando en todas las acciones desde la difusión hasta el servicio post venta, pasando por el apoyo a procesos de cotización, licitación, fabricación, montaje y puesta en

marcha de equipos. Estos profesionales dedicados al soporte de producto en la región deben coordinarse con el resto de la organización existente tanto en Chile y Perú como en otras locaciones, en donde se gestiona el negocio de equipos de flotación.

- Ingeniería y Diseño. Estas tareas se desarrollan para todo el mundo desde Francia (Macon), Suecia (Sala), Estados Unidos (York) o Canadá (Toronto). Cada oficina se especializa en temas específicos, y debe mantener constante comunicación con los ingenieros de soporte.
- Gerentes de Producto. Debe existir uno para celdas RCS y otro para columnas Microcel, y deben encargarse de dirigir y coordinar a nivel mundial las actividades de ingenieros de soporte en conjunto con oficinas de ingeniería y diseño, siguiendo las directrices matrices de la compañía.
- Preparación de Propuestas. Se debe disponer de especialistas para la preparación de propuestas centralizadas a nivel global. Estos deben trabajar próximos a oficinas de ingeniería y deben coordinarse con ingeniero de soporte.
- Control de Documentos. Cuando se desarrollan proyectos de diseño, fabricación y suministro de equipos para una planta, se debe dedicar un especialista al control de documentos que se emiten y reciben hacia y desde las empresas de ingeniería que el mandante asigne.
- Inspección de calidad fabricación. Durante la fabricación de equipos, se debe asegurar el cabal cumplimiento de las especificaciones.
- Administración de contratos. Es un profesional dedicado a la gestión de contratos con clientes y proveedores.

## **6.8 Restricciones de la compañía para implementar estrategia**

Metso tiene una amplia experiencia y reconocimiento de la industria como proveedor de equipos para beneficio de minerales, sin embargo, las principales dificultades para implementar la estrategia aparecen al abordar los proyectos integrales tipo EPC, debido a su complejidad y aún poca experiencia de la compañía en tal tipo de desafío.

Para alcanzar el éxito en este tipo de contrato, se debe establecer prematuramente relaciones de confianza con empresas constructoras especializadas en montaje industrial. Es recomendable avanzar en la

ejecución de pequeños proyectos bajo esta modalidad, y de esta forma ganar experiencia en los siguientes aspectos entre otros:

- Coordinación de trabajos con mandante y con otros contratos
- Obtención de permisos
- Gestión de contingencias y cambios
- Control de desviaciones de costos y plazos
- Control de pagos
- Control de compromisos
- Gestión de recursos humanos

## **6.9 Recursos y costo esperados**

Para sostener y consolidar la participación de Metso en el negocio de equipos de flotación en la región, se debe asegurar a los profesionales dedicados al soporte de producto en la región. Este grupo de especialistas debe realizar las actividades claves que permiten vincular a los clientes con los centros mundiales de diseño y desarrollo de equipos, creando y alimentando los lazos de confianza que son la base para concretar el negocio de largo plazo.

El costo anual de mantener este staff de 2 profesionales, más un asistente, junto con las actividades que estos desarrollen, se muestra a continuación.

Remuneraciones	300	kUSD
Oficinas	10	kUSD
Recursos tecnológicos	5	kUSD
Camionetas	35	kUSD
Viajes internos región	60	kUSD
Viajes externos región	30	kUSD
Participación congresos	10	kUSD
Capacitación	10	kUSD
<b>Total</b>	<b>460</b>	<b>kUSD</b>

## 6.10 Resultados esperados

El crecimiento de la industria minera en la región hace prever la demanda de celdas mecánicas y columnas de flotación, de la cual Metso puede alcanzar una participación relevante.

Mercado Potencial de celdas mecánicas en la región.

Para estimar la cantidad de celdas mecánicas que serían demandadas, se consideran los siguientes criterios:

- tonelaje o capacidad de tratamiento de mineral a instalar
- volumen instalado por tonelada de mineral tratado

Como se vio anteriormente, para la minería del cobre en Chile, la capacidad potencial de tratamiento nueva proyectada alcanza a 820 millones de toneladas anuales, equivalentes a 2,2 millones de toneladas por día. Por otra parte en la minería peruana se desarrollarán proyectos de cobre, plomo y zinc, cuya capacidad se estima en 1,8 millones de toneladas por día. De este modo, la capacidad total proyectada esperada alcanza a 4 millones de toneladas diarias de mineral que se deberán flotar.

El volumen instalado de celdas mecánicas se encuentra en un rango entre 100 y 140 metros cúbicos por cada 1000 toneladas diarias a tratar, lo cual depende de las características geometalúrgicas de cada mineral.

Con lo anterior, se estima que el volumen de celdas mecánicas requerido en la industria minera chilena y peruana se encontrará en un rango entre 400 mil y 560 mil metros cúbicos, equivalentes a entre 1330 y 1860 celdas de 300 metros cúbicos, o un número inferior si es que los diseños adoptan equipos de mayor volumen (500 – 600 metros cúbicos).

Este negocio es del orden de 500 a 900 millones de dólares en equipos, para la próxima década, considerando para cada celda de 300 metros cúbicos un precio en torno a 400-500 mil dólares.

Capacidad a instalar cobre Chile	:	820 Mt/año 2,2 Mt/día
Capacidad a instalar Perú (Cu, Pb, Zn)	:	1,8 Mt/día
Capacidad a instalar total región	:	4,0 Mt/día

Demanda específica de celdas	:	100 a 140 m <sup>3</sup> /kt/día
Volumen celdas requerido	:	400 mil a 560 mil m <sup>3</sup>
Equivalencia celdas 300 m <sup>3</sup>	:	1330 a 1860 unidades
Valor celdas mecánicas	:	500 a 900 MUSD

Mercado potencial de columnas de flotación en la región.

Para estimar las columnas de flotación a instalar, se utiliza el siguiente criterio:

- Capacidad de producción de concentrado final
- Volumen instalado por tonelada de concentrado producido

Respecto a la producción de concentrado asociada a nuevas plantas, en Chile alcanzaría a 3,5 millones de toneladas por año de cobre contenido en aproximadamente 12 millones de toneladas de concentrado. A lo anterior se suma la capacidad de la minería peruana, y la de otros minerales, con lo cual los concentrados producidos se encontrarán aproximadamente en 24 millones de toneladas por año.

Por cada mil toneladas anuales de concentrado producido, la capacidad requerida en columnas se encuentra entre 1,2 y 1,8 metros cúbicos. De aquí se determina el volumen total de futuras columnas requeridas, que se encontrará entre 29 mil y 43 mil metros cúbicos.

Lo anterior equivale a un total de entre 145 y 216 columnas de 200 metros cúbicos, por ejemplo de 16 metros cuadrados por 12,5 metros de altura.

El valor de estas columnas se encontrará entre 70 y 120 millones de dólares en equipos, distribuidos en una década.

Producción concentrados cobre Chile	:	12 Mt/año
Producción conc Peru Cu, Pb, Zn	:	12 Mt/año
Producción total Concentrados	:	24 Mt/año
Demanda específica de columnas	:	1,2 – 1,8 m <sup>3</sup> /kt año conc
Volumen columnas requerido	:	29 mil a 43 mil m <sup>3</sup>



Equivalencia columnas 200 m<sup>3</sup> : 145 a 216 unidades

Valor columnas : 70 a 120 MUSD

De esta forma, se tiene un potencial de entre 570 y 1020 MUSD de equipos de flotación a ser adquiridos para los diferentes proyectos mineros que se desarrollarán en la región Chile-Perú durante la próxima década.

Se espera en un plazo de cinco años capturar el 30 % de los proyectos en desarrollo, y al final del decenio alcanzar a un 50 % de participación en el negocio de celdas mecánicas y columnas en la región. Es decir, se podría alcanzar una participación promedio del mercado de un 40 %.

Lo anterior equivale, en el caso que se ejecute toda la cartera de proyectos necesaria para alcanzar la producción esperada a alcanzar ventas entre los 220 millones de dólares hasta un máximo de 400 millones de dólares acumulados en la década.

Considerando el margen de utilidad de estas ventas entre 10% y 15%, entonces el rango posible de utilidad para la compañía oscilaría entre 22 y 60 millones de dólares durante la década.

## CONCLUSIÓN

La industria minera de la región (Chile y Perú) cuenta con una cartera de proyectos de inversión en plantas concentradoras, que representan una oportunidad de negocio de equipos de flotación. El monto potencial del negocio mencionado se encuentra entre 570 y 1020 millones de dólares durante la próxima década.

Metso cuenta con la capacidad y una oferta competitiva para el mercado regional de equipos de flotación. Sin embargo, la baja participación histórica y mínima presencia de equipos en la industria, especialmente los de mayor tamaño que se emplean en los nuevos proyectos, son una desventaja relativa, dados los criterios conservadores y de aversión al riesgo de la industria minera, que da preferencia a adquirir equipos probados.

Uno de los aspectos relevantes para introducción al mercado es hacer notar el mejor rendimiento que pueden lograr respecto a equipos de la competencia, que permiten aumentar los beneficios de la operación en montos equivalentes a recuperar el costo de los equipos durante el primer año de operaciones, dejando el resto de vida útil para obtener beneficios netos. Esta ventaja compensa el mayor consumo de energía de la tecnología Metso, que en costos equivale al 10 % de los beneficios de su mejor rendimiento, pero que por ser más evidentes de evaluar en etapas de ingeniería, logran desplazar la oferta.

Si bien es cierto que los significativos beneficios del mejor rendimiento debieran ser un argumento poderoso para elegir un equipo respecto a sus alternativas, estos son difíciles de demostrar si no se prueban las alternativas en paralelo en idénticas condiciones, más aún si existe una mínima base de equipos en la región. Entonces el precio de los equipos es relevante para mejorar las opciones de entrar al mercado. Se presenta entonces el imperativo de optimizar los diseños, mejorar la cadena de suministro y asociarse con proveedores (maestranzas) con los mejores precios a nivel global, lo cual permite alcanzar ventajas absolutas de precio frente a la competencia en Chile y Perú.

Para trabajar con las maestranzas certificadas de mejor precio en el mundo, tales como las de Turquía, se propone modificar los diseños de tanques para adaptarlos a transporte marítimo vía contenedores, y de esta forma compensar la mayor distancia de transporte. Esta modalidad no es utilizada por los competidores, que trabajan únicamente con proveedores locales, ubicados entre los de mayor costo en el mundo.

Otra forma de mejorar y diferenciar la oferta de equipos es incorporando e integrando a ésta tecnologías de punta existentes en la compañía, que apuntan a mejorar los sistemas de control automático y conectividad de los equipos, permitiendo su seguimiento remoto en línea por parte de especialistas de Metso, lo que contribuye a maximizar su confiabilidad y optimizar su modo de operación. Este atributo es desconocido por la industria y puede significar el inicio de una nueva era o nueva generación de equipos de flotación.

Para soportar e impulsar en el mercado regional esta oferta de equipos de flotación, es indispensable mantener un staff de especialistas dedicados a establecer vínculo con los clientes, incluyendo no sólo a operadores de plantas de procesamiento de mineral, sino también a especialistas de empresas de ingeniería y centros de investigación, desde las etapas iniciales de cada proyecto, pasando por diferentes niveles de estudios, y finalmente hasta la etapa de puesta en marcha y post venta. La carencia de estos especialistas en Chile explica en gran medida la escasa participación de Metso en el mercado de equipos de flotación en Chile; y en contraparte explica el mejor resultado en Perú, donde sí hubo mayor dedicación a este negocio.

El crecimiento en escala de los equipos utilizados en la industria minera no excluye a los de flotación, donde Metso se encuentra un paso atrás de sus competidores, especialmente en celdas mecánicas. Es necesario desarrollar en corto plazo equipos de capacidad equivalente a los mayores que dispone la competencia, para evitar ser descartados en los próximos proyectos que buscarán introducir los últimos desarrollos del mercado que permitan optimizar sus diseños y costos.

Adicionalmente se propone actividades complementarias que mejoran y enriquecen la oferta. Estas actividades son la validación permanente de tecnologías, innovación y desarrollo de productos, difusión y promoción de tecnología y desarrollo de herramienta de simulación para uso interno.

El costo directo de sostener un staff de especialistas en Chile-Perú se estima en 460 mil dólares anuales, mientras que las utilidades posibles de obtener si se alcanza una participación de mercado del 40 % durante la próxima década, se encuentran en un rango entre 22 y 40 millones de dólares.

De esta forma se puede fortalecer y consolidar la presencia de Metso como proveedor de equipos de proceso para la industria minera, incluyendo los equipos de flotación, que pasarían a ser un gran complemento a los equipos

de conminución con los que Metso ha liderado la industria durante la última década.

## Bibliografía

1. Porter, M.; What is Strategy; Harvard Business Review; 1996
2. Comisión Chilena del Cobre; Anuario de estadísticas del cobre y otros metales 1992-2011; 2012
3. Comisión Chilena del Cobre; Anuario de estadísticas del cobre y otros metales 1993-2012; 2013
4. Comisión Chilena del Cobre; Catastro Mundial de Proyectos y Prospectos Mineros de Cobre periodo 2006-2015; 2007
5. Ostewalder, A., Pigneur, Y., Smkith, A.; Business Model Generation, Wiley, 2010
6. Yianatos, J.; Flotación de Minerales; 2005
7. Miskovic, S.; An investigation of the gas dispersion properties of mechanical flotation cells: an in-situ approach; 2011
8. Promotores Multimedia SAC; Perú: Proyectos mineros del futuro; 2011
9. Del Campo, S.; Estrategia Nacional de Energía 2012-2030; 2012
10. Chadwick, J.; Greater Buoyancy; International Mining; Jul 2009
11. Chan Kim, Mauborgne, R.; La estrategia del océano azul; 2008
12. Comisión Chilena del Cobre; Inversión en la minería chilena, cartera de proyectos 2013-2021; 2013
13. Comisión Chilena del Cobre; Mercado internacional y minería del molibdeno en Chile; 2009
14. Sociedad Nacional de Minería Petróleo y energía; Informe Quincenal; abril 2012

15. Castro, S.; Chile es pionero en la aplicación y desarrollo de la flotación de cobre; 2010.