



FLOTACIÓN DE MOLIBDENITA

Aspectos de Diseño de Planta de Flotación de Moly



25 DE DICIEMBRE DE 2024

ALFONSO VIDEGAIN
Roberto del Rio 1641 - Providencia

Contenido

1. Metalurgistas y Procesistas	3
2. La Flotación Espumante	3
3. Factores que afectan a la Flotación	4
4. Circuitos de Flotación de Moly	6
5. Circuito de Flotación de Moly Collahuasi	11
6. Circuito de Flotación de Moly Antamina	13
7. Circuito de Flotación de Moly El Teniente	17
8. Flotación de Moly Cerro Verde (Antes de la Ampliación)	19
9. Planta N° 2 de Flotación Selectiva Las Tórtolas	23
10. Planta de Flotación Selectiva División Andina Codelco	25
11. Planta de Flotación Selectiva Los Pelambres	27
12. Planta de Flotación Selectiva QB Phase 2	30
 Tabla 1 - Recuperaciones Flotación de Molibdenita	8
Tabla 2 – Espesador Intermedio Flotación de Molibdenita.....	28
 Figura 1: Factores que Afectan la Flotación.....	5
Figura 2: Freezing Point (Temperatura a la cual la solución empieza a cristalizar)	6
Figura 3: Circuito Típico Flotación de Moly	9
Figura 4: Circuito Alternativo Flotación de Moly.....	10
Figura 5: Circuito Collahuasi Flotación de Moly.....	11
Figura 6: Esquema Celda Autoaspirante Wemco	12
Figura 7: Comparación de la neutralización con CO ₂ versus un ácido mineral	13
Figura 8: Esquema parte Superior Estanque de Acondicionamiento	14
Figura 9: Circuito Original Flotación de Molibdeno Antamina.....	15
Figura 10: Celda Outotec.....	16
Figura 11: Celda Columna CISA/Microcell de Metso	16
Figura 12: Circuito Flotación Rougher El Teniente	17
Figura 13: Celda Metso RCS	17
Figura 14: Esquema Parcial Flotación Selectiva El teniente	18
Figura 15: Arreglo General Planta de Flotación selectiva Cerro Verde.....	19

Figura 16: Diagrama de Flujo Simplificado Flotación Selectiva Cerro verde	21
Figura 17: Estanques de Sulfhidrato de Sodio Cerro Verde.....	22
Figura 18: Estanque de NaHS Cerro verde	22
Figura 19: Esquema Planta de Flotación Selectiva N°2 de Las Tórtolas	23
Figura 20: Foto Celdas Selladas Planta 2 Flotación Selectiva Las Tórtolas	24
Figura 21: Planta de Flotación Selectiva División Andina Codelco	25
Figura 22: Esquema simplificado Circuito Flotación de Moly División Andina.....	26
Figura 23: Esquema simplificado Circuito Flotación Molibdenita Minera Los Pelambres	27
Figura 24: Vector de Producción de Concentrado de Cobre MLP.....	29
Figura 25: Esquema simplificado circuito Flotación Moly Quebrada Blanca II	30

Metalurgistas y Procesistas

Yo me defino, profesionalmente hablando, como un procesista del área de Minería y Metales. No voy a intentar definir aquí que sea un metalurgista o un procesista, pero tengo que reconocer que es un desafío considerable llegar a ser un metalurgista extractivo. Por ejemplo, debería tener nociones de geología, minería, mineralogía, análisis instrumental y químico, geometalurgia, además de cierta familiaridad con pruebas de comportamiento de muestras minerales tales como competencia de roca, dureza de rocas, cinéticas de flotación, cinéticas de lixiviación, pruebas de filtración y de sedimentación, de reología, etc. Ya al asomarnos a la geometalurgia debemos saber entre muchas otras cosas, temas de litología, alteraciones, perforaciones diamantinas para testigos de roca que son independientes de las perforaciones para estudios geológicos y mucho más.

Esta presentación no será desde un punto de vista de un metalurgista, que no me siento autorizado para ello, sino desde el punto de vista de un ingeniero de procesos que ha dedicado gran parte de su carrera al diseño de plantas de beneficio de minerales, en particular: cobre, zinc, molibdeno, oro y plata. Tampoco será esta una oportunidad para hablar de las competencias esperadas de un ingeniero de procesos, salvo insinuar que debería saber al menos, bastante de operaciones unitarias, de instrumentación y control automático, de hidráulica, y otros temas interdisciplinarios de las especialidades de ingenierías duras, porque su aporte es, según mi punto de vista, el proponer un diseño de planta que será modificado en iteraciones con las otras disciplinas de ingeniería.

La Flotación Espumante

Una vez más insistir en un enfoque de procesos y no de metalurgia para este fascinante fenómeno de la flotación espumante. Más de 100 años de innovación en flotación espumante ha producido un volumen de literatura, de información científica y tecnológica imposible de abarcar en forma resumida. De manera que enfocaré el tema desde un punto de vista práctico, con recetas sencillas y directas sin introducirme en cuestiones mineralógicas que, por supuesto afectan como, por ejemplo, la presencia de caolinita, micas, arcillas, montmorillonita, serpentinas, en general filosilicatos, etc. Y más bien repetir el mantra del gerente de mina que responde al gerente de planta “la mina no es un supermercado”. A pesar de que aproximaciones holísticas tales como M2M (Mine To Mill) han demostrado una buena metodología para el acercamiento de posiciones entre mina y planta.

Tampoco repetir los lugares comunes de la estructura cristalina de la molibdenita con sus borde y caras de comportamiento bastante diferente en cuanto a sus propiedades hidrofóbicas, y para que decir si el tamaño de partículas, y por ende la relación borde caras cambia bastante.

Resumamos, para los más nuevos en este tema, que se trata de una flotación diferencial, en que debemos deprimir el cobre y flotar la molibdenita. Para eso las recetas (según mi entender) son:

- De los reactivos depresores de cobre el sulfhidrato de sodio sigue siendo el reactivo más eficaz. Debido a su alto costo, se continúa intentando reemplazarlo por otros. Pero no me parece que sea una opción óptima si el precio del molibdeno continúa siendo alto. Hablaremos más delante de este reactivo.
- Los reactivos de flotación de cobre que permanecen residuales en el agua de procesos de una concentradora juegan un papel que interfiere con la función depresora necesaria para el cobre. Se dice que el uso de ácido sulfúrico, usado principalmente como agente modificador de pH, ayuda a la destrucción de los reactivos colectores de cobre.
- Por la explicación anterior, quizás insuficiente, dar énfasis a la importancia de “reemplazar” aunque sea solo parcialmente el agua de procesos del concentrado colectivo por agua fresca, antes de la alimentación a una planta de flotación de molibdenita. Esto es posible porque normalmente la alimentación a la planta de flotación selectiva se diseña aguas debajo de un espesador de concentrado colectivo (denominado también como concentrado “bulk”¹).
- Yo les adelanto que pertenezco a “la escuela” de los que preferimos el CO₂ como agente modificador de pH. Varias razones pueden destacarse para esto.
- Porque el CO₂ tiene un efecto buffer que permite adicionar el gas en pocos lugares para que el PH se mantenga mucho más tiempo en valores adecuados para la flotación de moly. Además, a pH incluso neutros, el sulfhidrato de sodio está en un gran porcentaje en su forma de gas H₂S, altamente tóxico. Este gas tiene baja solubilidad en agua.
- Debido a su propiedad intrínseca de flotabilidad natural de la moly, el colector utilizado es el Diesel y se agrega en la etapa de flotación colectiva. Muchas veces se agrega más Diesel en la flotación selectiva.
- Las espumas de la flotación de moly se caracterizan por ser, en general, espumas tenaces que crean problemas en el transporte de pulpas dentro del circuito. El tema de los factores de espuma tiene su propio mérito como para tratarlo en una presentación dedicada. Digamos que los factores de espuma de las pulpas de moly pueden llegar a ser mayores a 3, lo que ya es un factor elevado. Pero agregaremos que: 1) se utiliza P4000 mezclado con Diesel que son agentes antiespumantes y 2) los mayores problemas de espumas tenaces se pueden mitigar con diseños apropiados de estanques, cajones, canaletas y bombas, todos estos elementos especialmente diseñados para factores de espuma elevados.

Factores que afectan a la Flotación

En la **Figura 1** se observa un excelente cuadro resumen de los factores que afectan a la flotación. Al ser tan elevado el número de factores se debe considerar, que más que la mera cinética de flotación, hay que observar este proceso como un fenómeno probabilístico. Desde un punto de vista, la colisión y adhesión partícula burbuja, en otro aspecto, el transporte de la burbuja mineralizada, primero hacia la zona de espuma, y luego hacia el labio de la celda. Pero las espumas son estructuras complejas, con tres fases: la burbuja de gas mineralizada con mena, rodeada de una película de líquido y dentro de dicha película de líquido pequeñas partículas de ganga atrapadas mecánicamente.

¹ “bulk” traducido como “a granel” se pronuncia algo así como “balk”.

Se dice que una clave de la flotación está en los fenómenos que rodean la formación, tamaño, y densidad de flujo de las burbujas que ascienden y finalmente constituirán la espuma mineralizada.

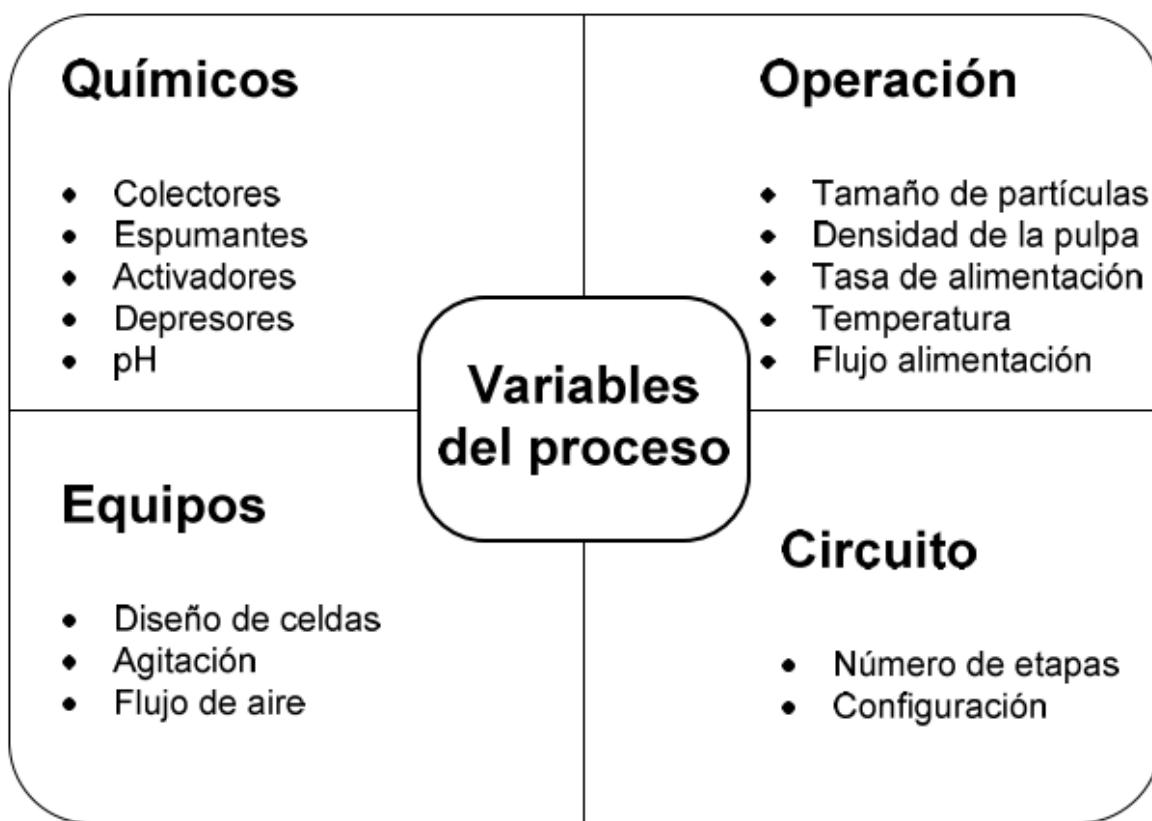


Figura 1: Factores que Afectan la Flotación

Cada uno de los factores mostrados en la Figura N°1 tienen un efecto importante en la flotación espumante.

Solamente adelantaremos uno de dichos factores: el sulfhidrato de sodio como agente depresor de minerales de cobre. En primer lugar, el control que en vez de ser mediante un lazo de flujo másico es un lazo de control basado en el potencial redox de la pulpa. Debe estar alrededor de -500 mV y el NaHS tiene varios efectos fisicoquímicos. En primer lugar, su adición baja el potencial redox y al mismo tiempo sube el pH de la pulpa.

Por razones un tanto discutidas por los metalurgistas, la flotación de moly debería efectuarse a pH bastante más bajo que el utilizado en flotación de cobre (el cual se baja para deprimir la pirita) pH de alrededor de 10,5 a 11. En flotación de moly se usan pH alrededor de 8 o 9, porque más bajos producen mayor cantidad de ácido sulfídrico (H₂S) gas venenoso y mortal. Los pH altos en flotación de moly están relacionados con la precipitación de hidróxidos metálicos en la superficie de los minerales interfiriendo en la química de los reactivos utilizados.

Roger Amelunxen indica que el NaHS es un modificador de tensión superficial y puede actuar como agente antiespumante en algunas situaciones.

Por último, cabe recordar que el NaHS comercial con una concentración en peso de aproximadamente 43 a 45% tiene un punto de cristalización muy elevado, de alrededor de 14

o 15 °C sobre cero, de manera que se deben aislar los estanques de almacenamiento e incluso utilizar calefactores eléctricos para mantener las soluciones concentradas a un poco más de 20 °C. Es uso acostumbrado tener otro estanque con soluciones más diluidas, alrededor de 20%, ya que a esa concentración desaparece el problema de la cristalización a temperaturas ambiente o incluso bajo cero.

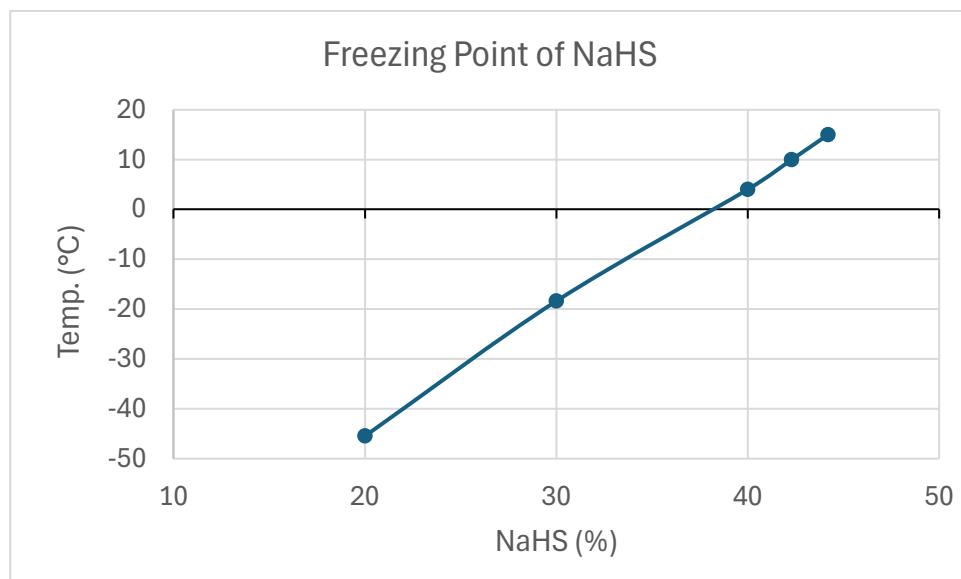


Figura 2: Freezing Point (Temperatura a la cual la solución empieza a cristalizar)

Circuitos de Flotación de Moly

Al igual que en la flotación de cualquier sulfuro metálico como la calcopirita, se requiere un cierto tiempo de residencia de la pulpa en la celda estanque, según la cinética de flotación.

En flotación primaria o rougher, en flotación de molibdenita, lo usual es considerar tiempos largos de alrededor de 40 minutos. Este tiempo se aplica para toda una fila por donde pasa la pulpa y se debe calcular el número de celdas de cierto tamaño para lograr, según el flujo, el tiempo de residencia requerido.

Aquí es donde voy a enfatizar un tema ya conocido por los expertos, pero que he observado que no comprenden los que se inician en este tema: la diferencia conceptual entre un banco de celdas estanque y una fila de celdas estanque.

Un banco es un conjunto de celdas estanque que comparten el mismo lazo de control de nivel de pulpa. El control de nivel de pulpa, y en cierto modo el nivel de espuma de una celda es fundamental para influir en la recuperación de la especie a flotar, la ley de la especie a flotar y la recuperación en peso (Mass Pull), del concentrado de la etapa de flotación.

Aquí introduciré un concepto de uso cotidiano en operaciones y que pudiera confundirse con la cinética de flotación. Sabemos que la cinética de flotación está relacionada con la velocidad de flotación global de una especie mineralógica determinada en la alimentación. Así, se cree que los minerales portadores de cobre tienen una cinética mayor que la de la molibdenita. Esto porque la molibdenita presenta una distribución de tamaños mucho menor a las especies de

cobre. Sabemos que las cinéticas de flotación, en general, son mayores para partículas de rango medio de tamaños y que las partículas de mayores tamaños, así como las de menores tamaños, presentan una recuperación inferior a las de tamaños medios. Pero más adelante hablaremos de “velocidad de flotación” que es un concepto diferente.

La velocidad de flotación está relacionada con la velocidad con que la espuma mineralizada se mueve desde la superficie de la celda hasta el labio de descarga. Si pensamos en una situación, en estado estacionario, en que, a un nivel dado de pulpa, el nivel de espuma es más elevado, con respecto al labio de descarga, esa situación provocará una velocidad de la espuma menor que si la capa de espuma fuera más delgada. Esto, porque en el balance de masa para una evacuación de un flujo dado de pulpa la velocidad dependerá de la altura de la capa de espuma sobre el labio. Recordar la expresión elemental de la relación entre velocidad, área y flujo:

$$Q = V \times A$$

$$Q = m^3/h$$

$$V = m/s$$

$$A = m^2$$

El área de la espuma en un corte vertical sobre la capa de espuma que rebosa sobre el labio de la celda depende de la altura de dicha capa.

Se tiene consenso en las siguientes cuestiones relacionadas con la velocidad de flotación:

- A mayor velocidad de flotación (capa de espuma más delgada) se mejora la recuperación de las especies que se desea flotar. Esto porque por arrastre, mayor cantidad de sólidos son transportados hacia el labio y se reportan en el concentrado. Incluyendo especies con liberación parcial.
- A menor velocidad de flotación (capa de espuma de mayor espesor) se producen una caída de especies no adheridas por colector, hacia el seno de la pulpa, es decir, la espuma mineralizada mejora su ley por disminución de ganga atrapada mecánicamente en la espuma que se mueve hacia el labio.

Otro concepto de gran importancia en la flotación espumante es el de “Mass Pull” (MP) o recuperación en peso de sólidos en el concentrado con respecto a la alimentación.

En flotación de molibdenita, en particular en flotación primaria o “Flotación Rougher”, se debe controlar el MP. Porque si este valor es muy superior al 10%, digamos el 15% o superior, se producirá una flotación indeseada de cobre que sobrecargaría los circuitos de limpieza, lo que se debe evitar. Roger Amelunxen et al señalan que con celdas estanque el principal problema en rougher es que aun en circuitos bien operados, al menos un tercio del cobre flotado en los roughers lo hace por mecanismos de atrapamiento, mientras que con columnas se elimina este “entrainment”. Continúa Amelunxen explicando que si el operador no está consciente de esto, agregará más NaHS cuando los niveles de cobre estén altos en los roughers sin prestar atención a parámetros más relevantes: de altura de la cama de espuma², tasas de gas, y recuperación de agua.

² La altura de la cama de espuma de cada celda o grupo de celdas que comparten un control de nivel común (un banco), está relacionado con la velocidad de flotación, es decir con la velocidad con que

Por último, hay que destacar lo obvio, que siempre buscamos que la alimentación al circuito rougher sea estable, para poder manejar los niveles de espuma y las velocidades de flotación. En algunas estrategias de flotación, se programan los niveles de espuma con diferentes alturas en la fila de flotación. Los primeros bancos tendrán mayores niveles de espuma para lograr mayores leyes, mientras que los últimos bancos menores niveles para maximizar la recuperación.

Finalmente, hay que destacar la importancia del porcentaje de sólidos en la pulpa de una celda de flotación. Dicho porcentaje no debería ser superior a 35- 38% para una mejor cinética de flotación de la especie útil que se desea recuperar. A mayores porcentajes de sólidos la viscosidad de la pulpa aumenta provocando interferencias en los fenómenos de colisión partícula-burbuja, adherencia y transporte hacia la capa de espuma mineralizada.

Una observación obvia, pero necesaria de destacar es que existe una relación aproximadamente lineal entre la ley de cabeza de Mo en el mineral a flotación colectiva y la ley de Mo en el concentrado colectivo. A mayor ley de cabeza en el mineral mayor ley en el concentrado colectivo.

Aunque no entraremos en los aspectos de balances metalúrgicos en plantas de flotación de molibdenita, puede ser interesante la **Error! Reference source not found.**, que es un legado de Juan Aravena, un metalurgista de la U de Concepción que trabajó muchos años en el tema.

Tabla 1 - Recuperaciones Flotación de Molibdenita

Recuperaciones	Suficiente	Normal	Bueno
Rec. Mo Flot. Colectiva	60,0%	70,0%	80,0%
Rec. Mo Flot. Selectiva	80,0%	88,0%	92,0%
Rec. Mo Flot. Global	48,0%	61,6%	73,6%

Esta tabla fue compartida por Juan Aravena con el que escribe, durante el diseño de una planta nueva de flotación de moly para el proyecto Desarrollo Futuro Andina. Se trató de una ingeniería básica y fue interesante la participación no solo de Juan Aravena sino de personal de operaciones de la División Andina de Codelco, quienes exigieron flexibilidad operacional, lo que se tradujo en cambiar nuestro diseño de una fila con celdas rougher, primera y segunda limpieza

A continuación, se mostrarán algunos circuitos de flotación de molibdenita, que a juicio del autor de este documento, son los más típicos.

La **Figura 3** presenta un circuito de cuatro etapas de flotación de molibdenita. Esto es lo más típico hoy en día en diseño de plantas de flotación de moly. Las plantas antiguas se diseñaban con muchas etapas de limpieza lo que aumenta las cargas circulantes y puede provocar que el circuito “quede chico” ya que la carga hacia la etapa rougher aumenta al ingresar no solamente carga fresca sino también carga compuesta.

La carga compuesta incluye la carga fresca más la cola del circuito de primera limpieza.

la espuma se mueve hacia el labio de la celda. Mayor capa de espuma y menor velocidad permiten que las partículas no adheridas por hidrofobicidad a las burbujas puedan volver a la fase de pulpa.

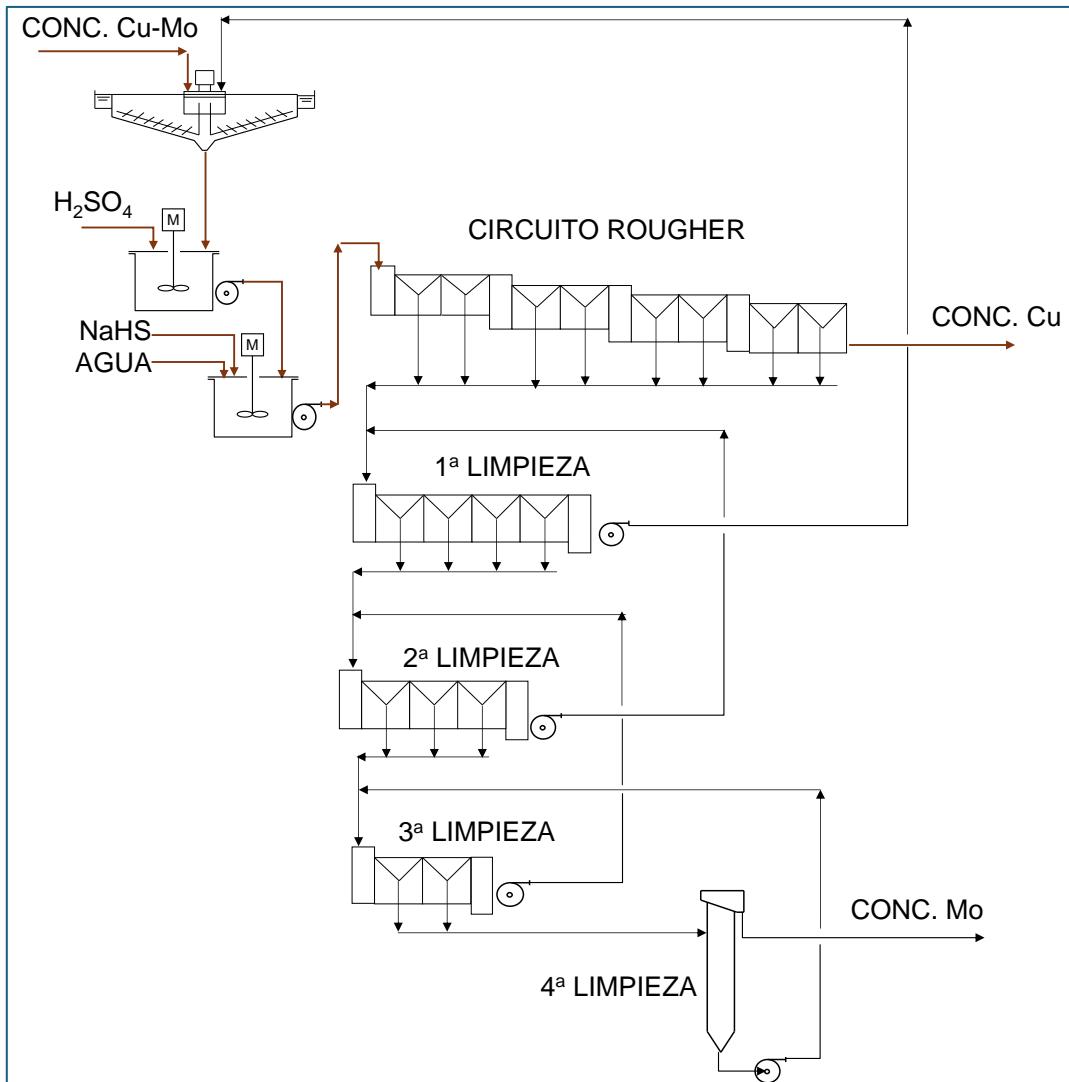


Figura 3: Circuito Típico Flotación de Moly

Una solución para mantener las cargas circulantes más bajas es agregar una etapa de flotación “Scavenger”, en que las colas de primera limpieza se flotan en dicho circuito, y la cola del Scavenger se une a la cola del circuito rougher. Ver **Figura 4**.

La **Figura 4** muestra un circuito de flotación de molibdeno con una fila de celdas rougher en configuración 2+2+2+2, es decir 8 celdas y cuatro bancos de dos celdas cada banco. Todo el concentrado rougher se alimenta a un circuito de primera limpieza al cual también se le agrega las colas de segunda limpieza. Las colas de primera limpieza se juntan con las colas rougher y se envían como concentrado de cobre al espesador de concentrado de cobre.

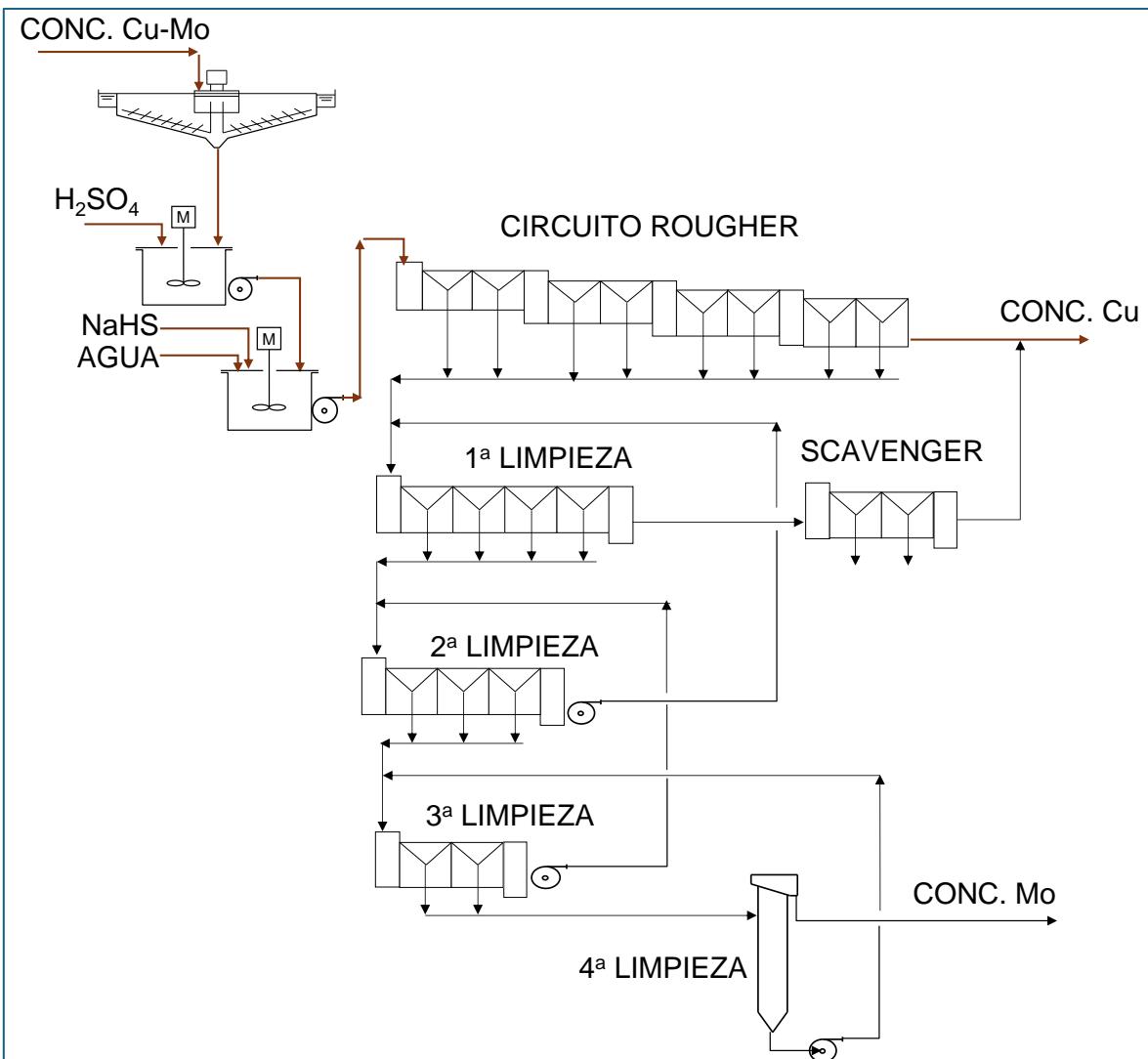


Figura 4: Circuito Alternativo Flotación de Moly

Círculo de Flotación de Moly Collahuasi

La **Figura 5** muestra un esquema simplificado del circuito original de la planta de flotación selectiva de Collahuasi.

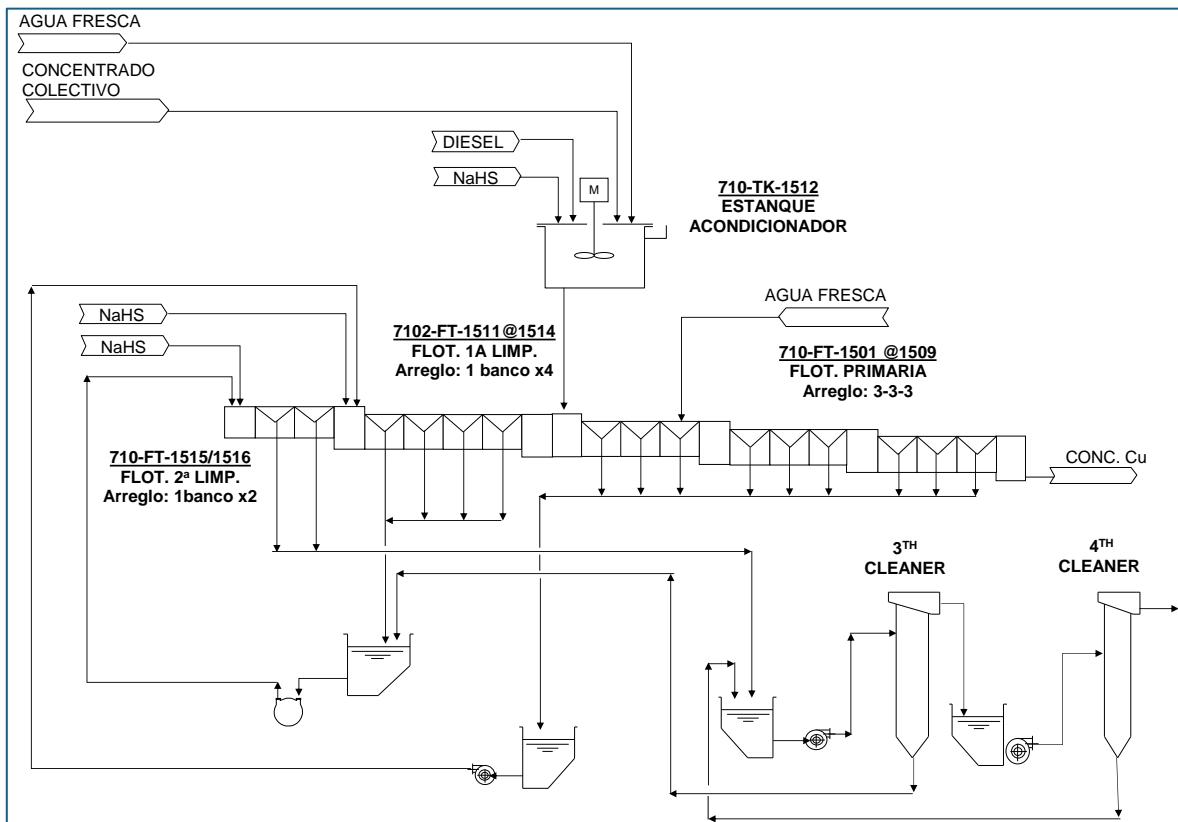


Figura 5: Circuito Collahuasi Flotación de Moly

En la **Figura 5** se observa uno de los circuitos más típicos que se han diseñado en Chile en los últimos años. Se trata de un circuito con celdas autoaspirantes, selladas que recirculan el aire enrarecido y empobrecido en oxígeno. La fila de celdas rougher se encuentra en el medio de una fila de celdas que componen, antes de las rougher, la primera y segunda limpieza. La pulpa fluye por gravedad desde las celdas ubicadas a mayor altura y los concentrados son impulsados con bombes en contracorriente hacia las celdas de limpieza ubicadas agua arriba de la rougher.

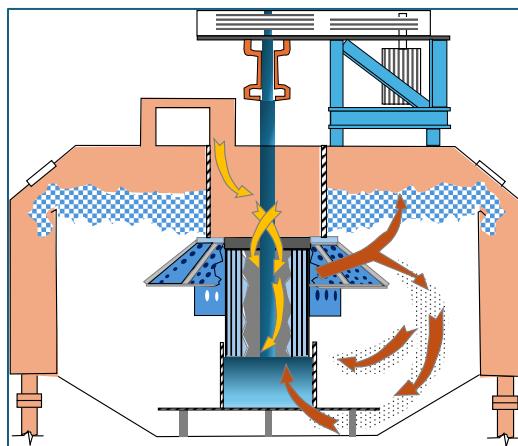


Figura 6: Esquema Celda Autoaspirante Wemco

Las celdas Wemco autoaspirantes (actualmente suministradas por FLSmidth), utilizan un rotor elevado sobre un tubo de arrastre que produce un flujo de pulpa que induce un vórtice que aspira aire desde una zona sellada ubicada sobre la pulpa y la espuma.

Como estas celdas son selladas se debe tener la precaución de evitar que durante un drenaje total de pulpa se produzcan un vacío que puede colapsar la celda. Para evitar esta situación las válvulas dardo de control de nivel tienen un sistema de control para que fallen cerradas en caso de interrupción de suministro eléctrico, o pérdida de señal neumática o de suministro de aire. Para el cierre de los dardos con actuadores neumáticos se requieren acumuladores de aire comprimido para el caso de pérdida de señal o blackout.

El espacio de gas (volumen de gas sobre la superficie de espuma y bajo la cubierta de la celda) de cada celda o banco de celdas, sus conexiones, las cajas de alimentación y descarga están conectadas a un ducto que tiene un trazado sobre las celdas. Este ducto está conectado a un lavador de gases. Normalmente el aire es recirculado en el espacio de gas dentro de la celda y por oxidación del NaHS, este aire se va empobreciendo en oxígeno disminuyendo el consumo de NaHS por oxidación. Sin embargo, si el nivel de pulpa en la celda baja rápidamente por efecto de una falla del sistema de control de nivel, se puede producir un vacío que puede dañar las ventanas de inspección o en el peor caso producir una implosión del estanque.

A pesar de las aparentes ventajas de las celdas autoaspirantes, en muchas faenas, por ejemplo, en Pelambres, se inyecta una cierta cantidad de nitrógeno para mejorar la producción de burbujas y asegurar un sistema de evacuación de H₂S, en caso de producirse por bajo pH, hacia el sistema de lavador de gases.

Se debe recordar un lugar común entre los operadores de circuitos de flotación: “el aire para producir burbujas es un reactivo más”. En el caso de la flotación de molibdenita el uso de nitrógeno reemplaza al aire o ayuda con el suministro de aire enrarecido en el caso de celdas autoaspirantes.

Círculo de Flotación de Moly Antamina

La planta de Antamina utiliza dióxido de carbono (CO₂) como reactivo gas para control de pH. Este reactivo gaseoso es más fácil de dosificar y presenta ventajas sobre el ácido sulfúrico dado el efecto buffer del dióxido de carbono, el cual mantiene por más tiempo el pH a valores adecuados para la flotación. Dicho pH es alrededor de 9 a 9,5 para evitar la formación de gas sulfídrico (H₂S) producto de la oxidación del sulfhidrato de sodio (NaHS).

La Figura 7 muestra las curvas de neutralización con un ácido mineral y con dióxido de carbono. Se observa que con el reactivo gaseoso el pH se mantiene más cerca de un rango acotado. En cambio, con el ácido mineral el pH baja abruptamente después de cierta dosificación.

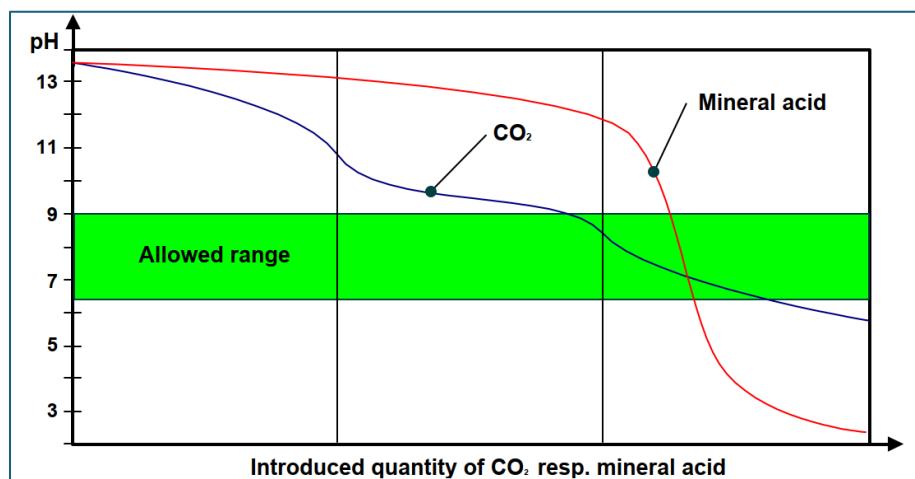


Figura 7: Comparación de la neutralización con CO₂ versus un ácido mineral

La Figura 8 presenta un esquema con las boquillas de entrada/salida del estanque de acondicionamiento del circuito rougher de flotación selectiva de Antamina.

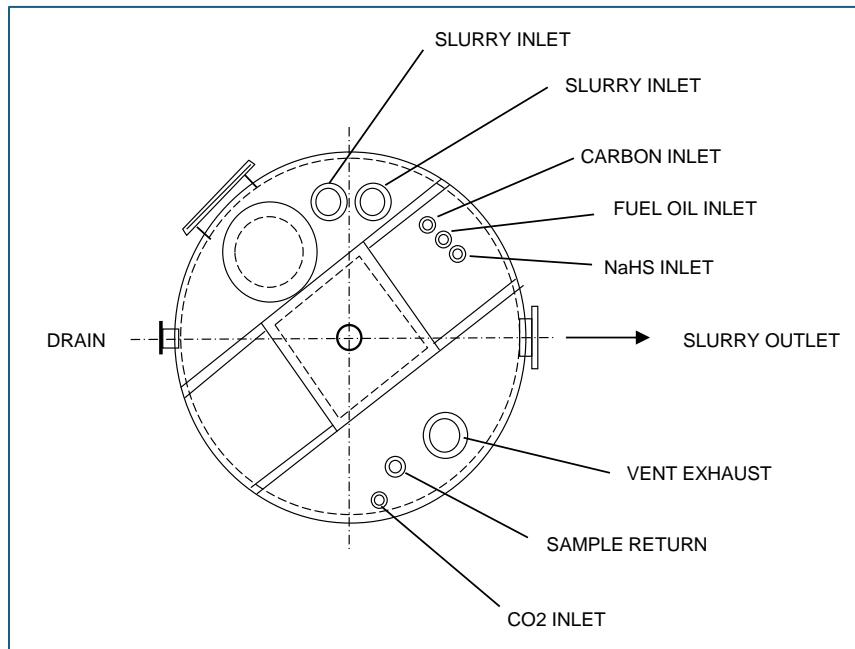
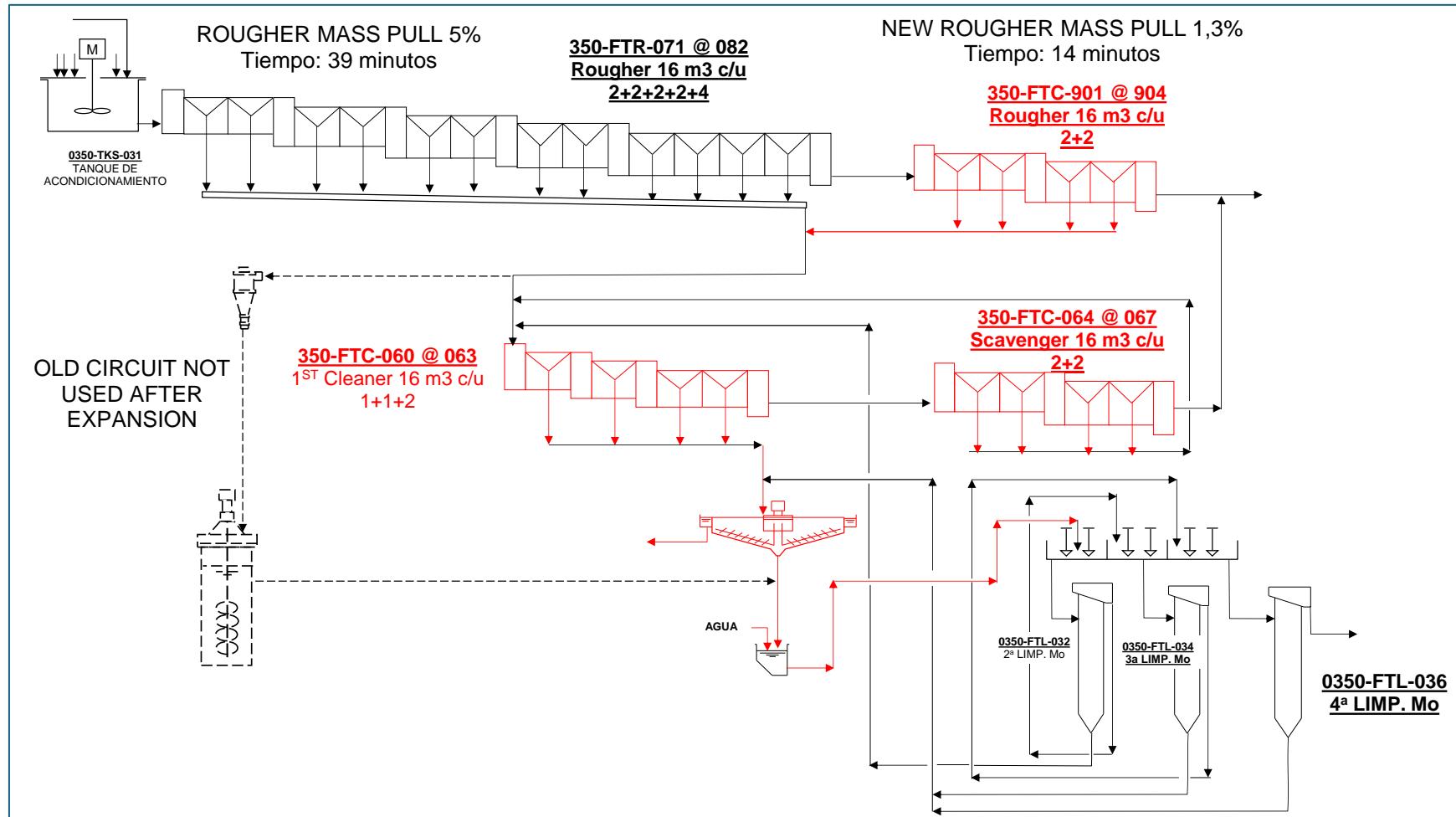


Figura 8: Esquema parte Superior Estanque de Acondicionamiento

La **Figura 9** muestra un esquema simplificado del circuito de flotación selectiva de Antamina, una concentradora de cobre-zinc-molibdeno y bismuto ubicada en Perú. El diseño original es de Bechtel e incluyó una remolienda con molino Vertimill. Sin embargo, en la ampliación posterior desarrollada por Aker Solutions, este circuito de remolienda se sacó de operación. Muchos proyectos actuales de flotación de molibdenita ya no incluyen etapas de remolienda, porque la producción de finos es un típico problema de estas plantas. De hecho, los espesadores de concentrado de molibdenita requieren un sistema de recuperación de finos desde el rebose de dichos espesadores. En algún momento se pensó en filtros polishing, pero el uso de diesel como colector colmata el medio filtrante del filtro polishing haciendo su uso inviable. En Andina, en su circuito de flotación de moly utilizan un clarificador para tratar los reboses y con buenos resultados.

El circuito original de flotación de moly de Antamina estaba basado en todas las etapas de limpieza en columnas. La ampliación³ de la concentradora incluyó una etapa de primera limpieza en celdas estanque y dejó todas las columnas para limpiezas segunda, tercera y cuarta. Además, incluyó una etapa Scavenger y reutilizó dos espesadores existentes usados para otros fines, reasignando la tarea de espesadores intermedios para ajuste de porcentaje de sólidos a la flotación en columnas.

³ La concentradora fue diseñada originalmente para 70.000 o 100.000 t/d de mineral, dependiendo de si el mineral era tipo disgregado o de roca competente. La ampliación definió una capacidad máxima de 130.000 t/ para mineral competente.

**Figura 9:** Circuito Original Flotación de Molibdeno Antamina

La Figura 10 muestra un esquema de las celdas estanque OutotecOK 16-U, de 16 m³ nominales cada una. Todo el circuito de flotación en celdas estanque en Antamina utiliza estas celdas, en diferentes configuraciones de bancos y circuitos.

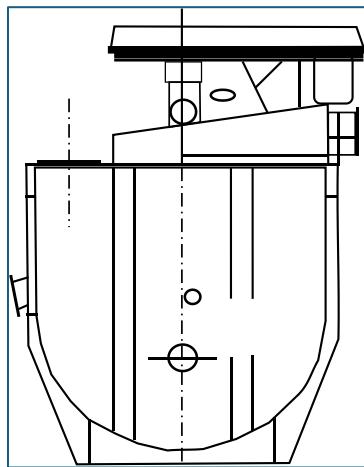


Figura 10: Celda Outotec

Para la ampliación se modificó el circuito agregando más celdas rougher y una primera limpieza en celdas estanque. Las limpiezas segunda, tercera y cuarta se realizan en celdas columnas. Algunas celdas columna se adaptaron a la tecnología Microcell con producción de burbujas más pequeñas. Ver Figura 11.

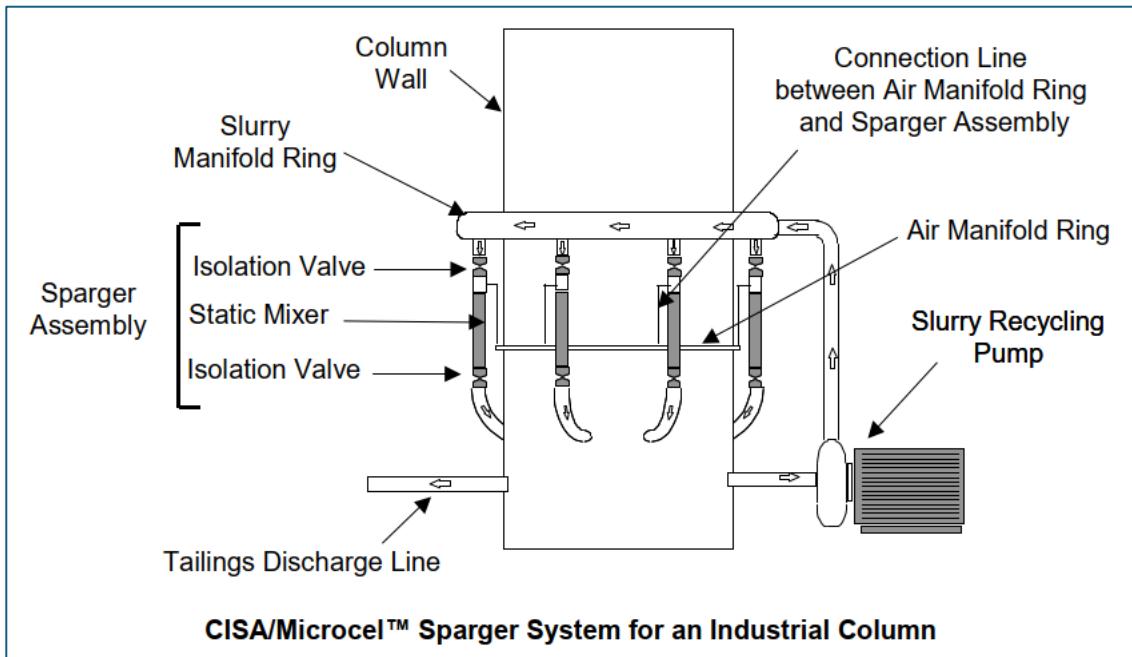


Figura 11: Celda Columna CISA/Microcell de Metso

Círculo de Flotación de Moly El Teniente

El circuito de flotación de El teniente es uno de los pocos en Chile que utilizan celdas estanque Metso tipo RCS. La **Figura 12** muestra un esquema simplificado del arreglo general del circuito de flotación rougher de molibdenita de El teniente.

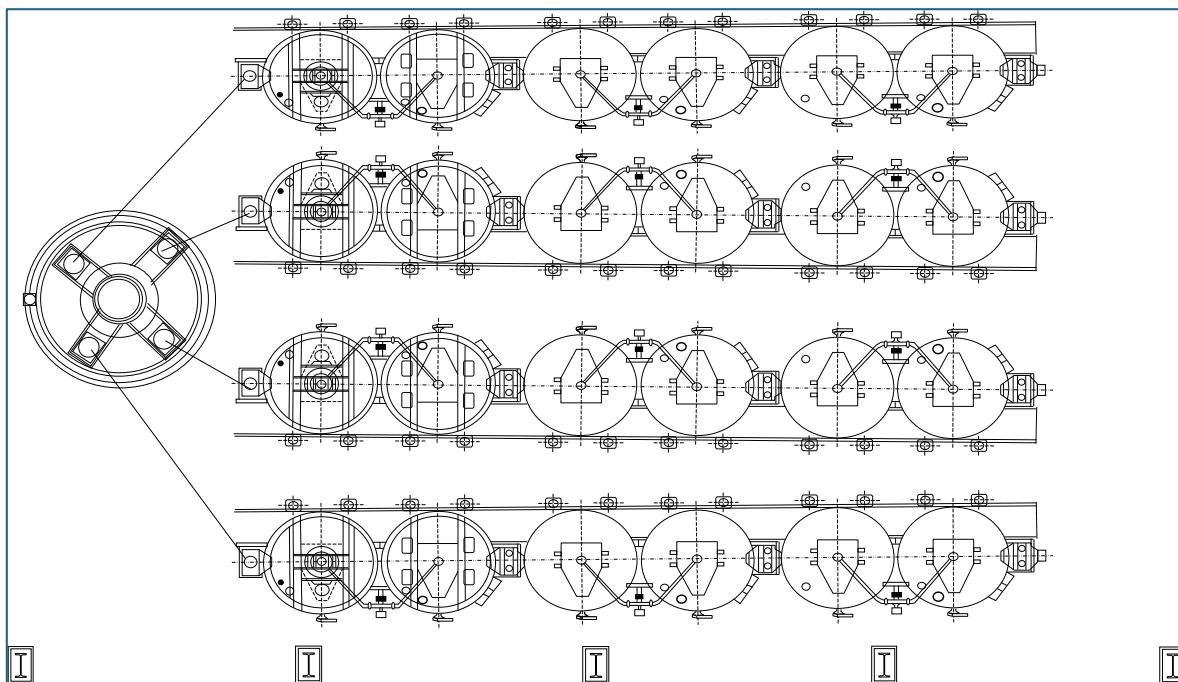


Figura 12: Circuito Flotación Rougher El Teniente

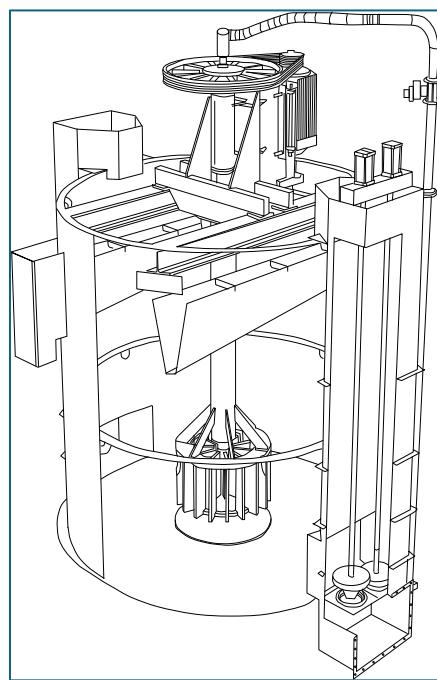


Figura 13: Celda Metso RCS

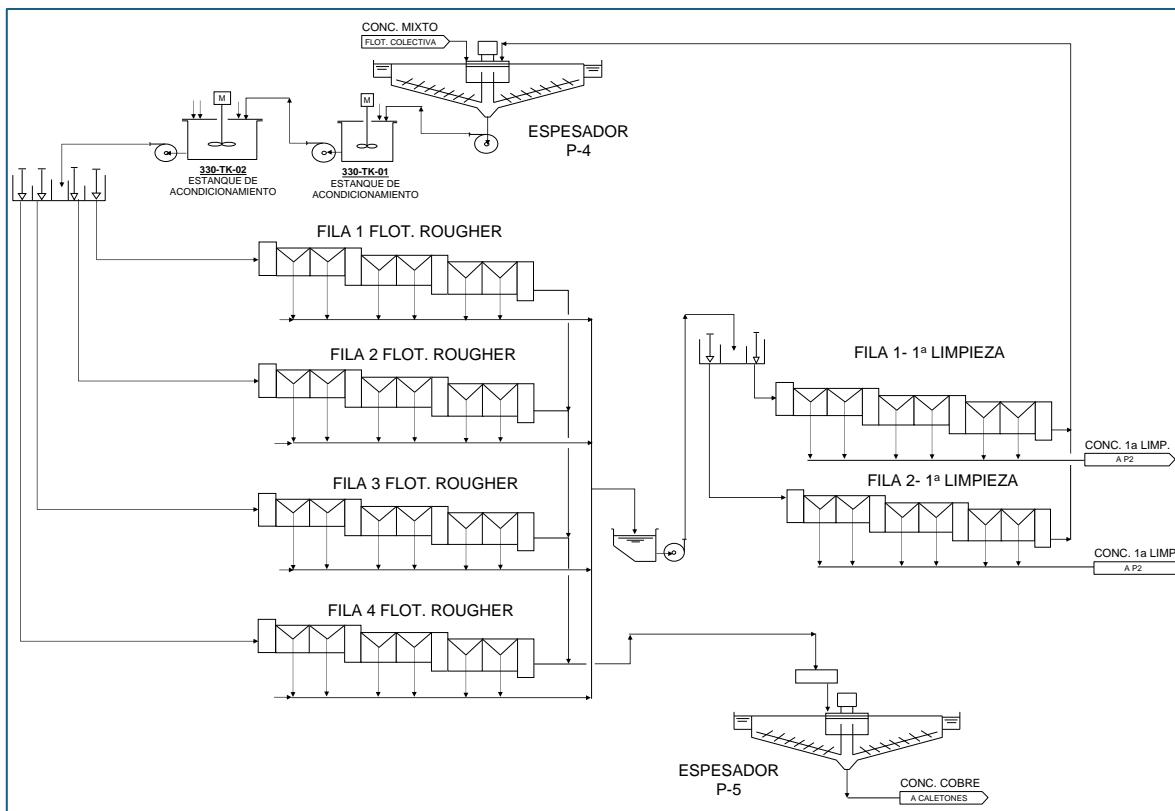


Figura 14: Esquema Parcial Flotación Selectiva El teniente

La **Figura 13** presenta un esquema con el tipo de celdas estanque marca Metso modelo RCS, que constituyen casi la totalidad de las celdas utilizadas en el circuito de flotación selectiva de El teniente.

La **Figura 14** muestra un esquema parcial del diagrama de flujo del circuito de El Teniente. Se observa que las colas de primera limpieza se devuelven al espesador de cabeza. Esto significa que la alimentación al circuito rougher no es alimentación fresca sino alimentación compuesta.

El año 2022 la producción de concentrado colectivo de El Teniente fue de aproximadamente 3.750 toneladas. Esta cifra nos permite estimar que se produjeron aproximadamente 39 t/d de concentrado de moly y que la alimentación fresca a la flotación selectiva estuvo alrededor de 155 t/h.

Antes de la ampliación, con los mismos datos el tiempo de residencia para flotación rougher, con solamente tres filas de celdas de 6 celdas cada fila tenía un tiempo de residencia de aproximadamente 30 minutos. La cuarta fila de celdas rougher para la misma producción aumentó el tiempo de residencia a 42 minutos.

Flotación de Moly Cerro Verde (Antes de la Ampliación)

Cerro verde es una concentradora ubicada en Perú, la cual fue diseñada originalmente para una capacidad nominal de tratamiento de mineral de 108.000 tpd. Posteriormente fue ampliada a más del doble, pero en esta descripción se hará referencia a la capacidad original. Con una ley de cabeza de molibdeno en el concentrado colectivo de 0,77%, y una producción de dicho concentrado bulk de alrededor de 127 t/h, la planta de flotación selectiva se diseñó con celdas autoaspirantes, pero con una configuración “no-típica”. La flotación rougher, primera limpieza y Scavenger de primera limpieza se basó en celdas autoaspirantes, mientras que desde la segunda limpieza hasta la quinta limpieza se realiza en columnas de flotación.

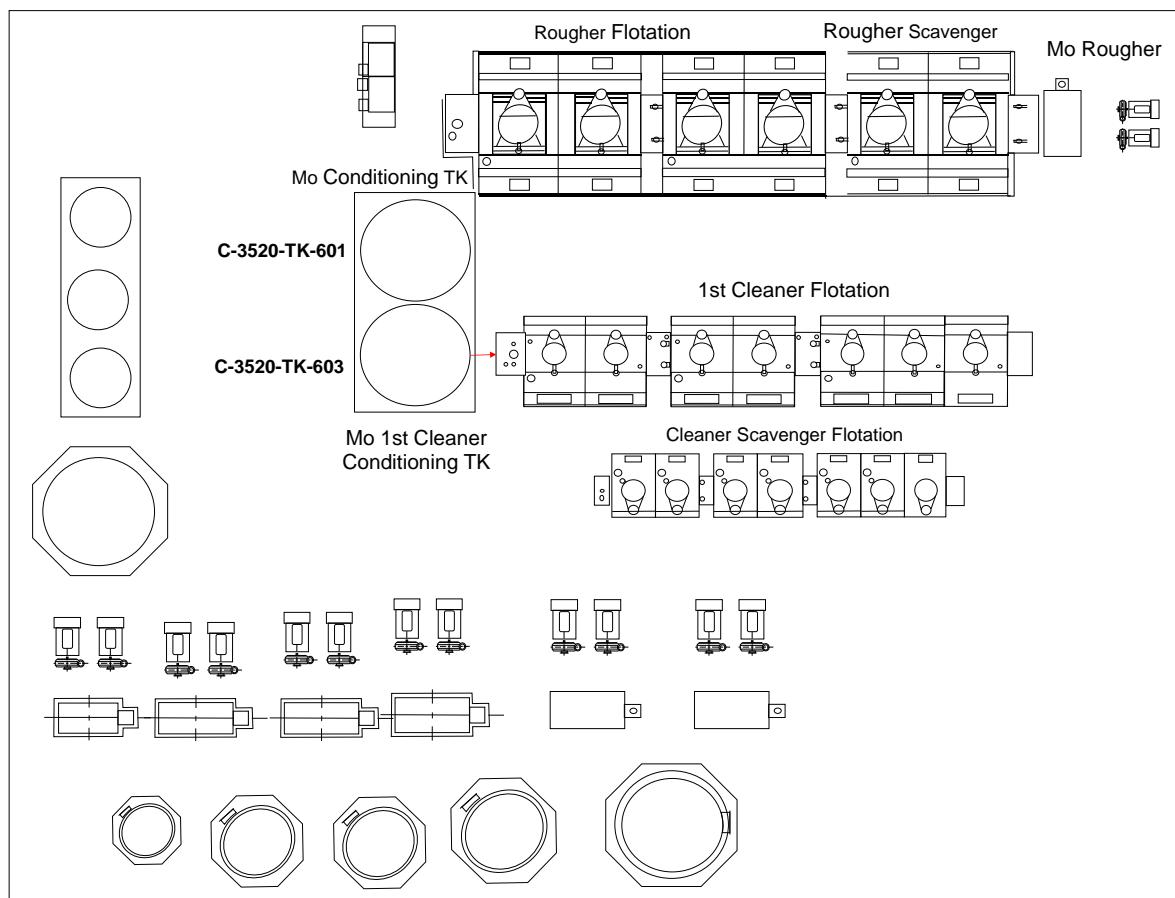


Figura 15: Arreglo General Planta de Flotación selectiva Cerro Verde

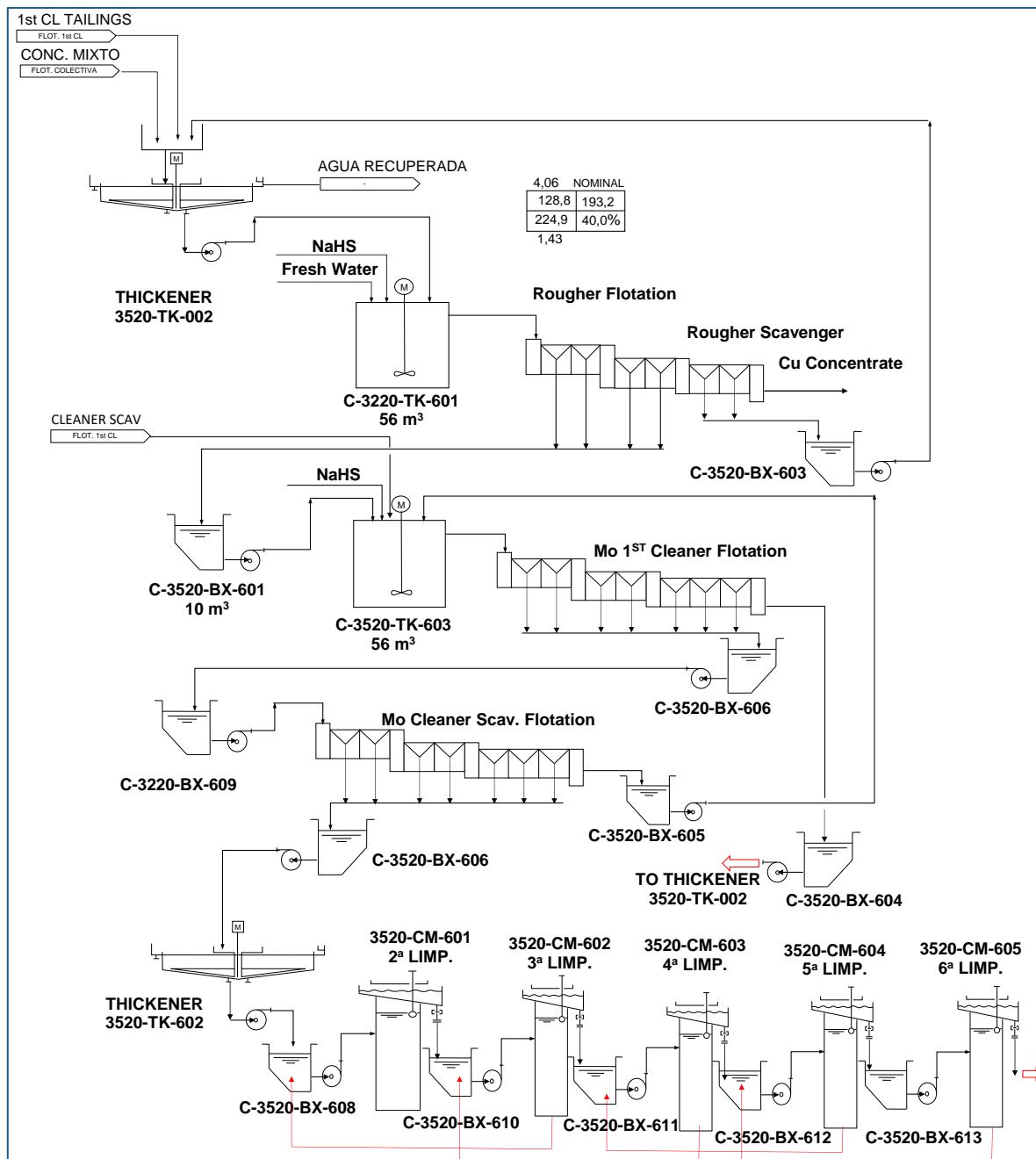
El control de pH no se encuentra en ningún documento o plano del proyecto. En el “Process Design Criteria” (de Fluor) no hay referencia alguna a dosificación de ácido sulfúrico ni dióxido de carbono. Tampoco se observa adición de estos reactivos en los PFD ni en los P&IDs. Sin embargo, Peter Amelunxen que trabajó en esta concentradora

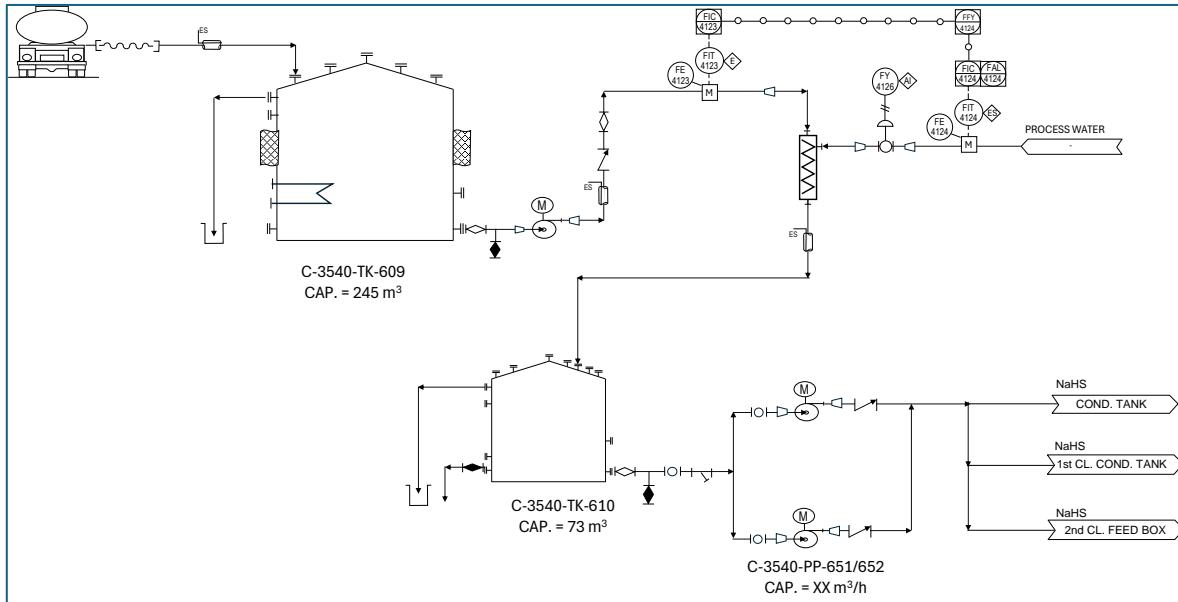
indica que el modificador de pH utilizado en Cerro Verde en su planta de moly es tipo control activo⁴ aparentemente con CO₂.

Otro aspecto curioso del diseño de esta planta de flotación de molibdenita es la cantidad de etapas de limpieza en columnas. En el diseño original se observa la 2^a, 3^a, 4^a, 5^a y 6^a limpieza en columnas. En la **Figura 16** se presenta un esquema simplificado del circuito de flotación de moly de Cerro Verde, tal como fue diseñado originalmente.

No tengo información de las modificaciones, si ocurrieron a este circuito original. Sin embargo, en Chile, en varias plantas, tales como Andina y El teniente han tendido a dejar en desuso las columnas. Es un caso curioso, pero puede explicarse por varios motivos. Uno es el aumento de cargas circulantes debido a que las columnas de flotación son equipos para mejorar la ley, pero sus recuperaciones no son tan altas como en las etapas de rougher o primera limpieza. El aumento de cargas circulantes implica una sobrecarga de alimentación en etapas aguas arriba y, además, aumentan el inventario de molibdeno en el circuito. A menudo se escucha a los operadores decir que el molibdeno hay que moverlo hacia adelante o apurar el circuito. Francamente no termino de entender esa expresión, porque en las etapas de flotación primaria se busca maximizar la recuperación de molibdeno, para lo cual se debe sacrificar la ley en dicha etapa. Esto se logra operando con una cama de espuma de menor altura que en las etapas en que se busca ley, en las cuales una mayor altura de espuma favorece la ley del concentrado.

⁴ Chapter 12.24, Molybdenum, SME, 2019, Peter Amelunxen (Aminpro), et al. Estos autores indican que un control de pH pasivo, basado en control cuidadoso de dosificación de NaHS, nitrógeno, y uso de agua de reposición con pH natural permitiría mantener el pH en el rango apropiado. En cambio, un control de pH activo hace uso de agentes acidificadores, tales como ácido sulfúrico o dióxido de carbono.

**Figura 16:** Diagrama de Flujo Simplificado Flotación Selectiva Cerro verde

**Figura 17:** Estanques de Sulfhidrato de Sodio Cerro Verde**Figura 18:** Estanque de NaHS Cerro verde

En la **Figura 18** se muestra una foto del estanque de almacenamiento de NaHS de Cerro Verde, y detrás las columnas de limpieza del circuito de flotación de moly.

Planta N° 2 de Flotación Selectiva Las Tórtolas

Existen dos plantas de flotación colectiva y dos de flotación selectiva en la concentradora Las Tórtolas. La planta de flotación selectiva N° 1 trata alrededor de 1.800 tpd de concentrado bulk y la planta de flotación selectiva N°2 trata alrededor de 2.300 tpd de concentrado bulk.

La ley de cabeza a la planta de moly se estima alrededor de 0,4% a 0,6% y la ley de concentrado final de Mo obtenido es entre 48% y 51%.

La planta de flotación selectiva N°2 de Las Tórtolas usa celdas inert gas en un circuito típico con el rougher precedido espacialmente por la primera y segunda limpieza. La tercera y última limpieza se realiza en columna. La **Figura 19** presenta un esquema simplificado del circuito de la planta 2 de flotación de moly de Las Tórtolas.

El circuito rougher tiene una configuración de 12 celdas de 300 ft³ en arreglo 3-3-3-3. Esto significa que el circuito rougher está constituido por cuatro bancos de tres celdas cada banco.

El circuito de primera limpieza incluye un banco de tres celdas de 300 ft³ cada una, y la cola de este banco de primera limpieza alimenta, junto con la carga fresca a la flotación rougher. El concentrado de la primera limpieza es bombeado hacia la alimentación de la segunda limpieza. Este circuito bastante común, instala las primeras limpiezas aguas arriba del circuito rougher y por desnivel transfiere las colas de dichas limpiezas aguas abajo hasta alimentar al circuito rougher. Aunque funciona es prácticamente imposible tener mediciones de flujos en los traspasos de estas colas. En cambio, los concentrados de los circuitos rougher, primera limpieza y segunda limpieza son bombeados hacia sus etapas consecutivas y pueden ser medidos estos flujos instalando flujómetros. Sin embargo, el circuito de Las Tórtolas solamente muestra flujómetros en las líneas de alimentación fresca al circuito rougher y en la descarga del espesador de concentrado de molibdenita, cuya descarga tiene además densímetro para integración de flujo másico del concentrado producido.

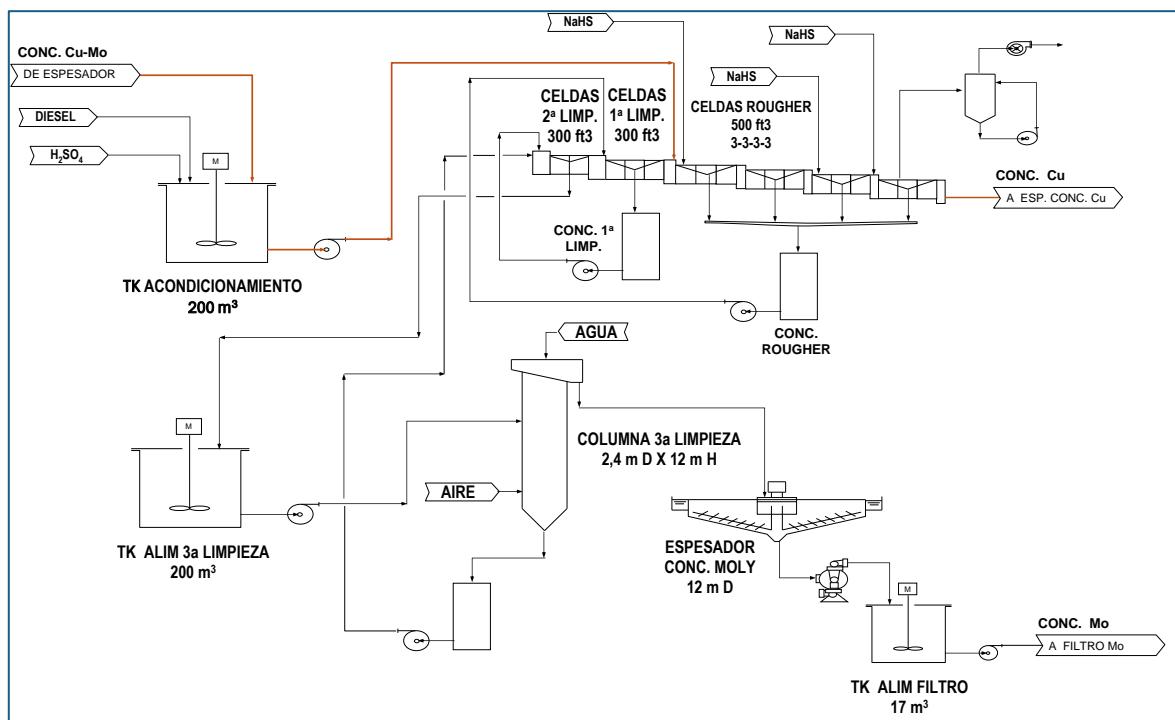


Figura 19: Esquema Planta de Flotación Selectiva N°2 de Las Tórtolas

Notar que la alimentación a la columna de tercera limpieza se efectúa desde un estanque de 200 m³ para lograr una alimentación estable. Para la flotación en columna de limpieza de moly se utiliza aire desde compresor dedicado. No se utiliza nitrógeno.

Sin embargo, algunas plantas que utilizan celdas inert gas, agregan nitrógeno para mejorar tanto la atmósfera inerte dentro de la celda, como para mejorar la producción de burbujas y la espuma.



Figura 20: Foto Celdas Selladas Planta 2 Flotación Selectiva Las Tórtolas

Planta de Flotación Selectiva División Andina Codelco

Recopilando información en la web encontré la pregunta: ¿Habrá algún aumento de producción en la División Andina de Codelco? La respuesta es No. La adecuación propuesta⁵ (ante los organismos reguladores) mantiene la capacidad productiva actual aprobada de 92 mil toneladas diarias de tratamiento.

La mayoría de las operaciones de la concentradora de Andina se ubican en cordillera y en locaciones subterráneas. En Saladillo se encuentran ubicadas, en la precordillera de la Región de Valparaíso, la planta de Molibdeno y Filtrado de Cobre de Andina, la planta LR y la Planta de Tratamiento de Efluentes.



Figura 21: Planta de Flotación Selectiva División Andina Codelco

La **Figura 21** muestra una fotografía con parte del circuito de flotación selectiva de División Andina de Codelco.

Andina con alrededor de 92 ktpd y con leyes de cabeza de cobre de alrededor de 0,6% produce aproximadamente 70 a 80 t/h de concentrado “bulk” de Cu-Mo con leyes de molibdeno alrededor de 0,7%. El circuito de flotación selectiva ha tenido cambios difíciles de seguir en las fuentes de acceso

⁵ Se recuerdan los proyectos Andina 244 en referencia a un aumento de capacidad hasta las 244 mil toneladas diarias de tratamiento de mineral y posteriormente el proyecto Desarrollo Futuro Andina que tenía como objetivo llegar a 150 mil toneladas diarias de capacidad de tratamiento de mineral. Estos proyectos estructurales han sido detenidos a la fecha de escribir este documento.

público, de manera que se presentará un circuito que en algún momento estuvo vigente, pero que puede carecer de equipos o configuración actualmente en operación.

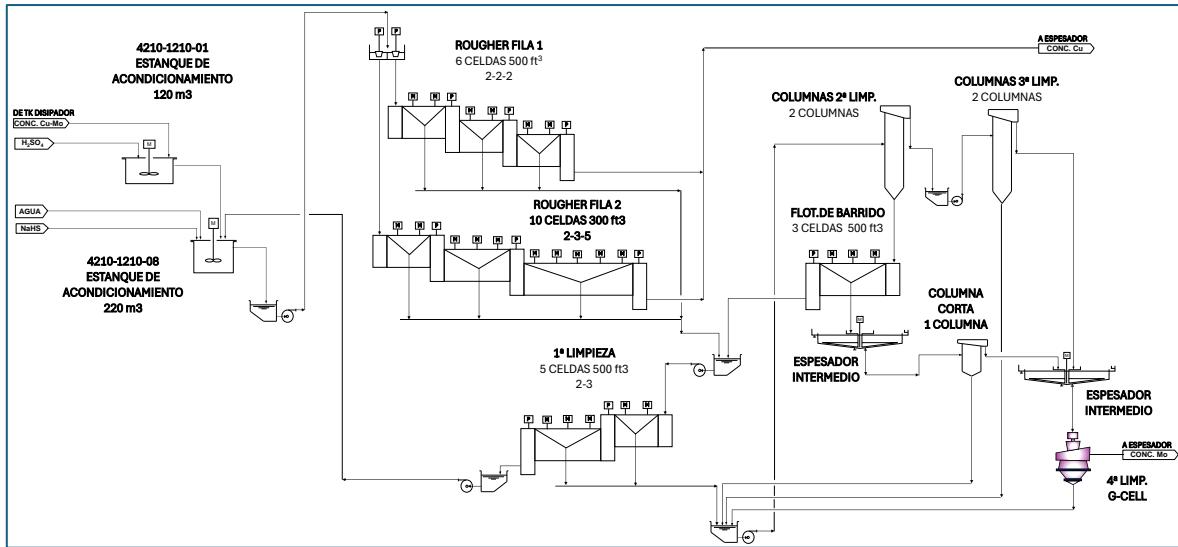


Figura 22: Esquema simplificado Circuito Flotación de Moly División Andina

La **Figura 22** muestra un esquema simplificado del circuito de flotación selectiva de la División Andina de Codelco. Aparentemente Andina ha incorporado celdas neumáticas también en la etapa anterior al circuito rougher.

Un par de datos interesantes de esta operación es la introducción de dióxido de carbono (CO₂) para reemplazar el ácido sulfúrico (H₂SO₄) como modificador de pH, con buenos resultados. Además, a pesar del uso de celdas selladas tipo inert gas, utilizan nitrógeno como gas para mejorar la producción de burbujas sin oxidar el sulfhidrato de sodio (NaHS) como depresante de cobre.

Es interesante destacar que el circuito rougher con dos filas de celdas selladas, a pesar del diferente tamaño de las celdas y de su diferente configuración de bancos, tienen el mismo volumen de flotación y por lo tanto el mismo tiempo de residencia cada fila rougher.

Según la literatura consultada, esta planta de flotación selectiva o diferencial no cuenta con un espesador de cabeza antes de la alimentación fresca a la flotación rougher. Esto significa que dicha alimentación no cuenta con un amortiguador de fluctuaciones y lo que quizás sea más grave, no cuenta con la posibilidad de controlar el porcentaje de sólidos y el reemplazo de agua de proceso por agua fresca en dicha alimentación. Estos son aspectos que deben ser considerados en el diseño de una planta nueva de flotación de molibdenita.

Planta de Flotación Selectiva Los Pelambres

En 2023 Minera Los Pelambres (MLP) produjo 8.100 toneladas de molibdeno. MLP es parte de Antofagasta Minerals, el principal grupo minero privado del país.

La planta de flotación de molibdenita de MLP está ubicada cerca de la concentradora de cobre, a 1.620 metros de altitud en la comuna de Salamanca.

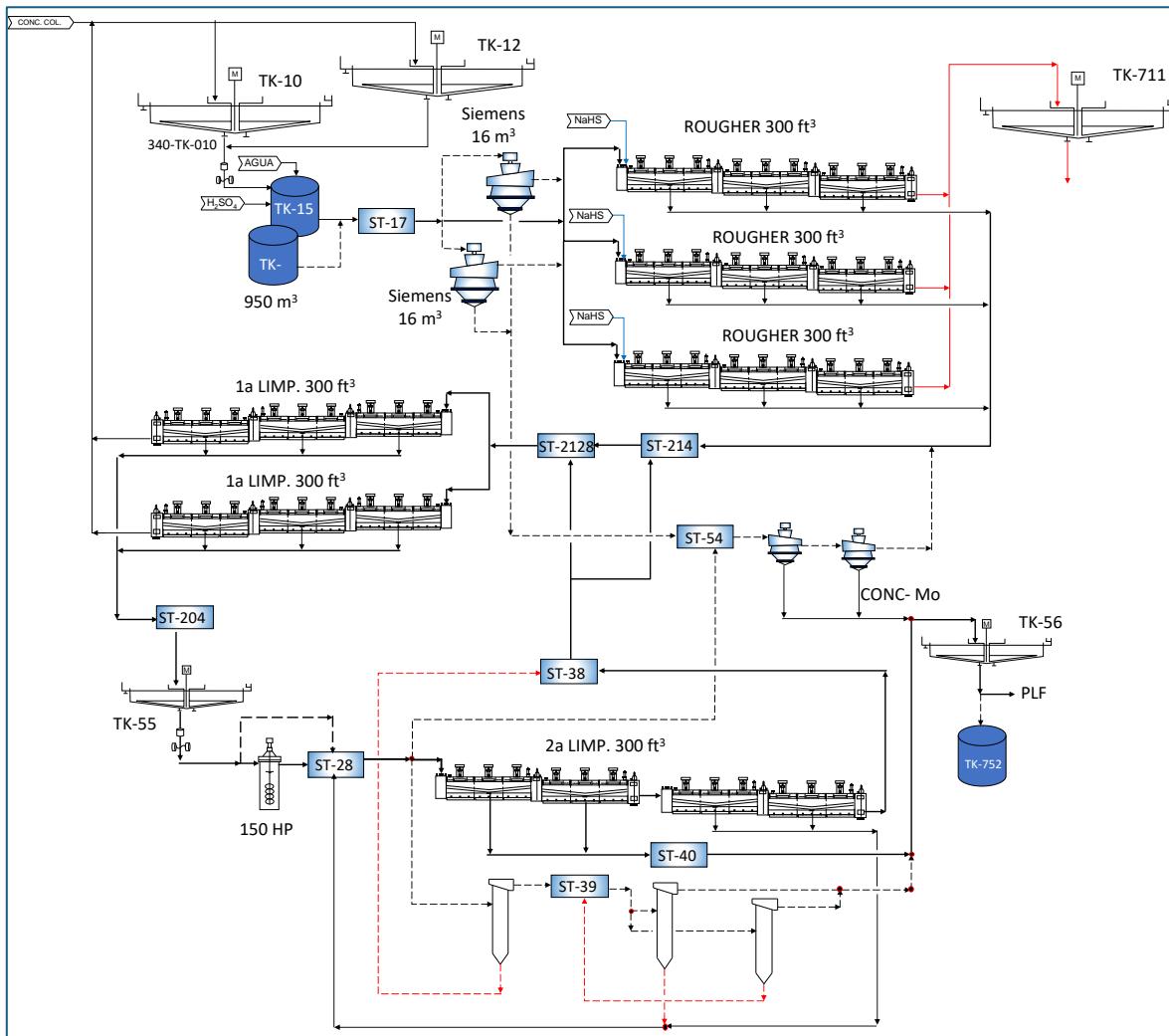


Figura 23:Esquema simplificado Circuito Flotación Molibdenita Minera Los Pelambres

El circuito original diseñado por Bechtel contaba con dos filas de 9 celdas rougher, cada una en arreglo 3-3-3, y volumen de 8 m³ cada celda. Como se observa en la **Figura 23** posteriormente se agregó una tercera fila de celdas rougher de idénticas características. Las colas rougher, como es usual, se envían al espesador de concentrado de cobre.

La primera limpieza también fue ampliada, con respecto al diseño original y consta de dos filas de celdas de 8 m³, en arreglo 3-3-3. El concentrado de primera limpieza alimenta a un espesador intermedio de 22,8 m de diámetro. El diámetro parece grande para una carga de aproximadamente 0,05 (t/m²/h). Sin embargo, cabe destacar que muchas plantas de flotación de moly no cuentan con espesador intermedio. Los finos de moly son difíciles de sedimentar y

algunas faenas han implementado clarificadores para tratar el overflow de espesadores de moly. Por ejemplo, Minera Andina de Codelco ha instalado con éxito un clarificador tipo Lamella de diseño y fabricación nacional. Para ser franco no tengo argumentos sólidos para justificar un espesador intermedio en una planta de moly. Salvo para ajustar el porcentaje de sólidos antes de las etapas de limpieza. También puede ser un equipo donde se ajusten ciertos parámetros como control pasivo de pH (agregando agua fresca después de la descarga), o agregando reactivos tales como NaHS para mantener el Eh alrededor de -500 mV, antes de las limpiezas posteriores.

Tabla 2 – Espesador Intermedio Flotación de Molibdenita

Concentradora		Alumbrera	Antamina	Cerro Verde	MLP	Collahuasi	Teniente	Tórtolas
Concentrado Colectivo	t/h	96	236	97	131	180	198	102
Esp. Intermedio (SI/NO), Diámetro	m	NO	6,1	15	22	NO	SI (2)	NO

En la **Tabla 2** se presentan algunos circuitos de flotación de moly con la información de si tienen espesador intermedio o no.

En el año 2008 durante una visita a la planta de flotación selectiva de MLP se recogió cierta información, que, a pesar de estar obsoleta, entrega criterios interesantes utilizados por operaciones en esa fecha.

La visita inició con una consideración de un señor de operaciones que planteaba las opciones de construir una concentradora de moly en la mina, cerca de la concentradora de cobre, como en MLP, o construirla en el puerto donde algunas mineras instalan su planta de filtros. Tanto MLP, como Collahuasi tiene su planta de filtros de concentrado de cobre en puertos donde embarcan el producto principal. MLP tiene su planta de flotación de moly cerca de la planta de flotación de cobre, cerca de la mina. En cambio, Collahuasi tiene su planta de flotación de moly en el puerto, lejos de la concentradora de cobre.

Estas consideraciones sugerían los posibles problemas de “envejecimiento” de la pulpa durante el viaje por el concentrado. Operaciones de MLP sosténían que ellos tenían dos estanques de 1000 m³ de capacidad cada uno, después del espesador de cabeza. Ellos declararon que solamente usaban, de preferencia un solo estanque ya que si la pulpa permanecía una semana almacenada en un estanque la recuperación de molibdeno en rougher de ese estanque bajaba desde 94% a 89%. Argumentaban que el problema detectado posiblemente se debía a alteración de la superficie de la molibdenita por efecto del ion Calcio (Ca²⁺). Que en esos casos debían agregar más ácido sulfúrico para limpiar la superficie. El estanque usado de 1000 m³ tenía un tiempo de residencia de alrededor de 5 horas.

En MLP en su planta de moly comentaban en la visita del año 2008, que las columnas de flotación no son buenas para moly ya que con recuperaciones muy bajas aumentan mucho las cargas circulantes. MLP ha probado con éxito celdas neumáticas tipo Siemens y G-Cell. Las celdas Siemens entregan concentrados de moly con leyes muy altas, pero sus recuperaciones eran entre 20 a 30%. Se dijo que después de las celdas Siemens, y con las celdas G.Cell se obtenía un concentrado de moly de ley final. Otro dato, conocido pero que fue ratificado en la visita, es que el molino Vertimill no es usado para moler, y se utiliza con muy bajo amperaje (poca carga de bolas) y en circuito abierto (una sola pasada).

La **Figura 24** presenta un vector de producción, estimado en el año aproximadamente 2020, para el concentrado de cobre que se filtrará en la planta de filtros cerámicos en Punta Chungo de MLP.

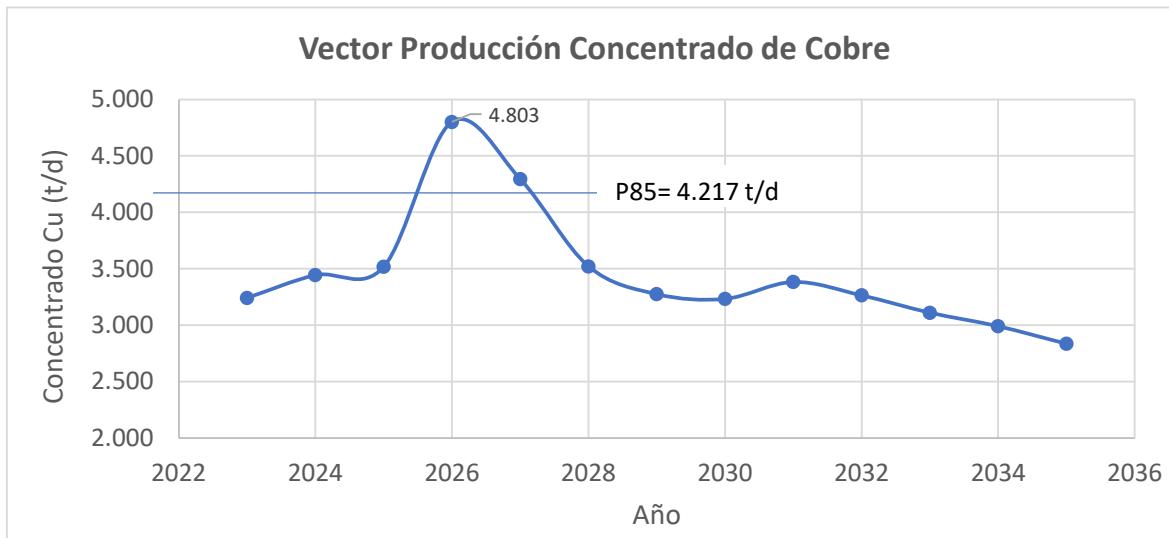


Figura 24: Vector de Producción de Concentrado de Cobre MLP.

Planta de Flotación Selectiva QB Fase 2

Quebrada Blanca es una operación a rajo abierto que inició su segunda fase operacional en 2023. La primera fase es una operación de lixiviación en pilas SX-EW. Esta segunda fase es una concentradora de cobre-moly con una capacidad nominal de 140.000 t/d de tratamiento de mineral sulfurado. Tiene una muy baja relación mineral-estéril, de sólo 0,7 por cada tonelada movida. Con leyes de cabeza de cobre de alrededor de 0,6% y de molibdeno de aproximadamente 0,02%, el proyecto de ingeniería de detalles desarrollado por Bechtel, estimó una producción de concentrado “bulk” de 136 t/h. Esa última cifra fue la capacidad nominal para la planta de flotación de moly. En el NI 43-101 de 2019 para Teck se indica que se produciría un concentrado de cobre con un promedio de 26% Cu, el cual sería aceptable por la mayoría de las fundiciones del mercado de concentrados de cobre.

La planta concentradora esta equipada con dos molinos SAG de 12,2 m x 6,7 m EGL con GMD de 24 MW cada uno. Cuatro molinos de bolas de 7,9 m de diámetro por 12,8 m flange a flange y GMD de 16,4 MW cada uno.

La **Figura 25** presenta un esquema simplificado del circuito de flotación de molibdeno de Quebrada blanca Fase II.

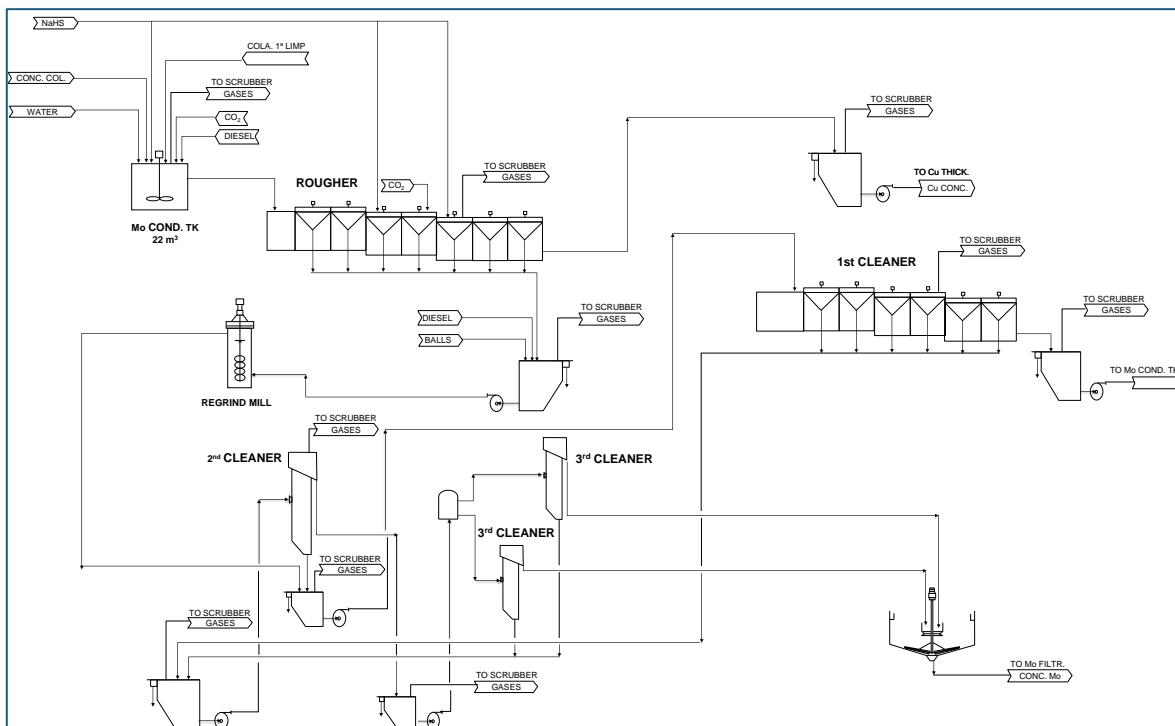


Figura 25: Esquema simplificado circuito Flotación Moly Quebrada Blanca II

Esta planta de flotación selectiva tiene un circuito rougher con una fila de celdas de 43,5 m³ en arreglo 2-2-3. Cuenta con un molino vertical de remolienda de 300 kW, y un circuito de primera limpieza con una fila de seis celdas de 14,2 m³ cada una en arreglo 2-2-2. La flotación de segunda limpieza se realiza en una columna de 3 m de diámetro y la tercera limpieza en dos columnas en paralelo de 1,5 m de diámetro. Todas las celdas y los cajones de traspaso están conectados a un lavador de gases.

La capacidad nominal de la planta de flotación de moly es de 136 t/h de concentrado colectivo. Usan sulfhidrato de sodio (NaHS) como depresante de cobre, y dióxido de carbono (CO₂) como regulador activo de pH.